



Microrobotique et Micromécatronique pour la Réalisation de Tâches de Micro-Assemblage Complexes et Précises.

Cédric Clévy

► To cite this version:

Cédric Clévy. Microrobotique et Micromécatronique pour la Réalisation de Tâches de Micro-Assemblage Complexes et Précises.. Automatique / Robotique. Université de Franche-Comté, 2015. tel-01342178

HAL Id: tel-01342178

<https://hal.science/tel-01342178>

Submitted on 5 Jul 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SPIM

Habilitation à Diriger des Recherches



école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**
UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

Microrobotique et Micromécatronique
pour la Réalisation de Tâches de
Micro-Assemblage Complexes et
Précises

■ CÉDRIC CLÉVY

SPIM

Habilitation à Diriger des Recherches



école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**
UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

de l'Université de Franche-Comté

préparée au sein de l'UFC

Spécialité : **Sciences et technologies, sciences pour l'ingénieur**

présentée par

CÉDRIC CLÉVY

Microrobotique et Micromécatronique pour la Réalisation de Tâches de Micro-Assemblage Complexes et Précises

Soutenue publiquement le 8 Décembre 2015 devant le Jury composé de :

Président :

YVES BELLOUARD Professeur, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Neuchâtel

Rapporteurs :

ÉRIC BIDEAUX Professeur, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon

STÉPHANE RÉGNIER Professeur, IUF et Université Pierre et Marie CURIE, Paris

JACQUES GANGLOFF Professeur, Télécom Physique, Strasbourg

Examineurs :

SKANDAR BASROUR Professeur, Université Joseph FOURIER, Grenoble

NICOLAS CHAILLET Professeur, Université de Franche-Comté, Besançon

FRÉDÉRIC LAMARQUE Professeur, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne

PHILIPPE LUTZ Professeur, Université de Franche-Comté, Besançon

SOMMAIRE

1 Remerciements	ix
2 Contexte, positionnement et structuration des travaux	1
2.1 Contexte général	1
2.1.1 Le micromonde et ses enjeux	1
2.1.2 Approche microrobotique pour le micro-assemblage	2
2.1.3 Challenges du micro-assemblage	4
2.2 Structuration de l'activité	7
2.2.1 Thématiques scientifiques	7
2.2.2 Séquencement de l'activité	11
2.2.3 Contexte collaboratif des travaux	15
2.2.4 Activités d'enseignement	16
2.3 Organisation du manuscrit	17
3 Problématiques scientifiques	19
3.1 Approches du micro-assemblage robotisé	19
3.1.1 Principes de préhension	20
3.1.2 Micro-assemblage automatisé	21
3.1.3 Approche retenue	23
3.2 Cas d'étude MOEMS : Micro-Banc-Optique	24
3.2.1 Concept du Micro-Banc-Optique	25
3.2.2 Fonctions élémentaires et leur réalisation	26
3.2.3 Assemblage d'un démonstrateur	27
3.3 Mise en évidence des problématiques du micro-assemblage complexe et précis	27
3.3.1 Caractérisation de la force de pull-off	27
3.3.2 Micro-assemblage téléopéré	29
3.3.3 Micro-assemblage automatisé par asservissement visuel	32
3.3.4 Micro-assemblage automatisé par commande hybride force-position	34
3.3.5 Caractérisation des assemblages réalisés	37
3.4 Synthèse des problématiques scientifiques et orientation des travaux	38

4	Analyse des performances des systèmes de micro et nanositionnement	41
4.1	Contexte et motivations des travaux	41
4.2	Métriques	43
4.2.1	Norme ISO 9283	43
4.2.2	Métrique utilisée	45
4.3	Principe de mesure et de référencement par mires pseudo-périodiques	46
4.3.1	Problématique et positionnement des travaux	46
4.3.2	Principe et méthodologie	47
4.3.3	Résultats et perspectives	48
4.4	Étude des systèmes de micropositionnement	49
4.4.1	Approche proposée	49
4.4.2	Étalonnage d'un porteur microrobotique $XY\Theta$	51
4.4.3	Résultats et perspectives	53
4.5	Étude des systèmes de nanositionnement	55
4.5.1	Approche et modélisation	56
4.5.2	Analyse des performances d'un porteur 1 DDL avant et après étalonnage	57
4.6	Conclusion et perspectives	60
5	Étude de nouveaux modes d'actionnement et proposition de nouveaux systèmes microrobotiques	61
5.1	Introduction	61
5.2	Actionneurs multi-DDL intégrés	62
5.2.1	Étude du PMN-PT	63
5.2.2	Étude de multi-couches piézoélectriques à film épais	70
5.3	Micropince 4DDL intégrée et instrumentée en force	74
5.3.1	Positionnement des travaux	74
5.3.2	Développement d'un capteur de force piézorésistif	76
5.3.3	Intégration du capteur dans la micropince	78
5.4	Plateformes actionnées et instrumentées	79
5.4.1	Plateforme instrumentée et observation d'entrée inconnue	80
5.4.2	Plateforme instrumentée à grand rapport plage-résolution	81
5.4.3	Plateforme actionnée instrumentée hautement intégrée	82
5.5	Conclusions et perspectives	83
6	Commande hybride force-position	85
6.1	Introduction et positionnement des travaux	85

6.2	Modélisation dynamique de la micropince instrumentée	87
6.2.1	Modélisation dynamique non-linéaire de l'actionneur piézoélectrique . .	89
6.2.2	Modélisation de l'organe terminal instrumenté	90
6.2.3	Modélisation dynamique complète du doigt de micropince instrumenté .	91
6.2.4	Identification des paramètres et validation expérimentale des modèles .	92
6.3	Stratégies d'assemblage et d'automatisation	93
6.3.1	Stratégie de prise	94
6.3.2	Stratégie de guidage	94
6.3.3	Stratégie de dépose	96
6.4	Plateforme de micro-assemblage automatisé	96
6.5	Commande dynamique pour l'automatisation de tâches complexes de micro- assemblage	96
6.5.1	Structure générale de commande	96
6.5.2	Contrôle dynamique des transitions contact/non-contact	99
6.5.3	Résultats expérimentaux	102
6.6	Conclusions et perspectives	103
7	Valorisation des travaux pour des activités d'enseignement et de transfert in- dustriel	107
7.1	Introduction	107
7.2	Activités de transfert industriel	108
7.2.1	Création de Percipio Robotics	108
7.2.2	Projets d'innovation et de collaboration industrielle	110
7.2.3	Pré-maturation de capteurs de microforces	110
7.2.4	Autres potentiels	111
7.3	Activités d'enseignement	111
7.3.1	Diffusion internationale	112
7.3.2	Création de nouveaux modules d'enseignement	112
7.3.3	Transfert de plateformes expérimentales	113
7.4	Conclusion	117
8	Conclusions et perspectives	119
8.1	Conclusions	119
8.2	Perspectives	120
8.2.1	Systèmes microrobotiques compacts et intégrés	121
8.2.2	Micro-assemblage haute cadence	123

8.2.3	Assemblage de composants nanophotoniques	125
8.2.4	Origamis micromécatroniques	128
9	Annexe A - Curriculum vitæ	131
9.1	Activités de recherche	133
9.1.1	Thématiques de recherche	133
9.1.2	Distinctions personnelles et des doctorants co-encadrés	134
9.1.3	Encadrements	134
9.1.4	Projets collaboratifs	137
9.1.5	Organisation de manifestations scientifiques	139
9.1.6	Collaborations internationales	139
9.1.7	Responsabilités collectives	140
9.1.8	Membre de comités de rédaction ou d'organisation de revues ou de congrès	141
9.2	Activités d'enseignement	141
9.2.1	Enseignement	141
9.2.2	Responsabilités	142
9.2.3	Transfert recherche-enseignement	142
10	Annexe B : Publications personnelles	145
10.1	Livres et chapitres de livres	145
10.2	Co-édition de numéro spécial en revue	145
10.3	Revue internationale à comité de lecture	146
10.4	Communications internationales dans des congrès avec actes	147
10.5	Communications	151
	Références Bibliographiques	153

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont débuté en 2006 au sein du laboratoire d'automatique de Besançon, devenu le département "Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques" de l'Institut FEMTO-ST. Je tiens, en premier lieu, à remercier les différents responsables d'équipes, de département et d'institut qui se sont succédé mais offrant une qualité d'environnement de travail constante et propice pour conduire ces activités de recherche. Je remercie également les différents partenaires qui ont cru aux idées que j'ai pu proposer et qui ont souhaité les encourager en les soutenant financièrement, les principaux étant la région Franche-Comté, les partenaires industriels, l'agence nationale pour la recherche, l'europe, l'université de Franche-Comté, l'ENSMM et l'école doctorale.

J'exprime toute ma gratitude aux membres du jury de cette HDR pour les nombreux échanges très intéressants que nous avons eu et qui contribueront, sans nul doute, à orienter mes futures activités. En premier lieu, je remercie Monsieur Yves Bellouard, Professeur à l'EPFL d'avoir présidé le jury de cette HDR, Messieurs Eric Bideaux, Professeur à l'INSA de Lyon, Stéphane Régnier, Professeur à l'IUF et à l'UPMC ainsi que Jacques Gangloff, Professeur à Télécom Physique de Strasbourg d'avoir fait l'honneur de rapporteur ce manuscrit, enfin, Messieurs Skandar Basrour, Professeur à l'UJF, Nicolas Chaillet et Philippe Lutz tous deux Professeurs à l'Université de Franche-Comté d'avoir examiné ces travaux.

Les travaux présentés dans ce manuscrit sont le résultat d'un travail collectif pour lequel de nombreuses personnes se sont investies énergiquement et efficacement. En premier lieu je remercie les doctorants (Kanty, Ning, Bilal, Adrian, Valérian et Houari), les post-doctorants (Ion, July, Anne, Alex et Vincent) et stagiaires que j'ai pu co-encadrer. Les travaux menés ont toujours été le fruit d'échanges très riches, très intéressants, particulièrement instructifs et agréables. Grâce à eux j'ai pu apprendre de nombreuses choses utiles à l'orientation des différentes activités de recherche. Les travaux conduits ont été possibles également par l'investissement d'autres collègues qui ont aussi pu apporter leur expertise et leur point de vue complémentaires, les échanges ont également été très riches et constructifs, ainsi, je remercie notamment Patrick, Micky, Joel, Nicolas, Patrick, Sylwester, Nadège, Christophe, Isabelle, Martine, Maurice, Maryvonne...

L'HDR, ne représente pas pour moi un aboutissement mais constitue néanmoins un instant privilégié pour mesurer le chemin parcouru. Les activités de recherche présentées dans ce manuscrit me procurent un plaisir quotidien intense et tout cela n'est possible que grâce à plusieurs périodes ou faits marquants dans ma trajectoire personnelle. En premier lieu, je remercie avec beaucoup d'émotions mes parents et mon frère, qui de part l'environnement familial m'ont permis de développer des compétences essentielles à mon activité de recherche comme la curiosité, la pugnacité, le plaisir, le goût pour l'effort, la rigueur et le respect.

Je remercie également mes professeurs de classe prépa qui m'ont fait découvrir le cœur de nombreux domaines mais surtout leurs interactions me conférant un gout prononcé pour la mécanique et les systèmes. J'ai également une pensée très émue pour Nicolas Chaillet et Nadine Piat qui m'ont accueilli lors de mon année de DEA et qui m'ont fait découvrir toute la passion du métier de chercheur, cela s'est avéré être un élément décisif pour mon projet professionnel qui s'est progressivement concrétisé. Je remercie aussi plusieurs collègues pour les échanges très privilégiés que nous avons pu avoir et qui se sont avérés décisifs pour définir des orientation majeures de recherche, des collègues avec qui j'ai des échanges quotidien, à mes yeux d'une grande valeur, je remercie plus particulièrement Kanty, Bilal, Guillaume et Nicolas. Enfin, je remercie de manière particulièrement chaleureuse Philippe Lutz avec qui j'ai partagé de nombreux co-encadrement. Nous avons toujours eu des échanges très constructifs, agréables et toujours au cœur des problématiques scientifiques. J'ai toujours trouvé une oreille attentive et reçu des conseils avisés ce qui a été particulièrement décisif pour mettre en œuvre des idées nouvelles.

Enfin, je ne saurais clore ces remerciements sans une pensée affectueuse pour ma femme et mes enfants, qui constituent mon projet de vie, et grâce à qui j'ai toujours trouvé un soutien réconfortant ainsi qu'une énergie rafraichissante. L'équilibre entre activités de recherche et vie personnelle qui s'est progressivement construit constitue aujourd'hui une synergie très importante source d'une forme de plénitude très agréable, merci encore.

CONTEXTE, POSITIONNEMENT ET STRUCTURATION DES TRAVAUX

Ce chapitre présente la structuration des activités de recherche que j'ai pu mener. Il débute par une présentation du contexte général et de ses enjeux et conduit au positionnement des travaux vers l'étude de tâches de micro-assemblage complexes et précises. Cet objectif général comporte plusieurs problématiques scientifiques, qui sont synthétisées, afin d'explicitier la structuration générale de mes activités scientifiques. Celle-ci intègre notamment les articulations et la synchronisation des travaux de recherche, des travaux d'encadrement et les travaux collaboratifs dans un cadre général de synergie recherche-enseignement-transfert industriel. Ce chapitre s'appuie largement sur les annexes 9 et 10 qui comportent un CV long, la liste de mes publications, des encadrements et des projets auxquels j'ai participé.

2.1/ CONTEXTE GÉNÉRAL

2.1.1/ LE MICROMONDE ET SES ENJEUX

Depuis une vingtaine d'années, les enjeux sociétaux, industriels ou scientifiques associés aux objets et systèmes miniatures se sont considérablement développés. Ils concernent aujourd'hui des domaines très variés comme le spatial, l'instrumentation, les télécommunications, la chirurgie, la biologie, la robotique, la mécanique ou les microsystèmes. Une grande partie de ces enjeux est concentré sur la maîtrise du micromonde, c'est à dire le monde des objets dont les dimensions sont comprises entre $1\ \mu m$ et $1\ mm$. De nombreuses spécificités liées à cette échelle dimensionnelle (détaillées en section 2.1.3) engendrent un déficit de connaissance notable de leurs comportements ou caractéristiques. Aussi, l'étude de ces objets qu'ils soient de nature biologique ou artificielle (voir Figure 2.1) constitue un premier objectif majeur. Les scientifiques mènent de nombreux travaux pour étudier leurs caractéristiques, leurs déplacements, leur réponse à différents stimuli (application d'une force par exemple), la possibilité de les déplacer, de les manipuler, etc (voir Figure 2.2).

Le second objectif majeur est de nature plus technologique puisqu'il consiste à proposer des systèmes toujours plus petits, plus intelligents, dotés de plus de fonctionnalités, plus versatiles... La réalisation de ce type de produits complexes est aujourd'hui particulièrement problématique (la section 2.1.3 explicite les raisons principales) et l'utilisation de moyens microrobotisés d'assemblage constitue une approche particulièrement intéressante et originale. Les systèmes présentés en Figures 2.2(a), (d) et (f) résultent, par exemple, de la synergie entre technologies de fabrication de composants élémentaires et moyens de micro-assemblage de ces composants élémentaires pour constituer un système final complexe.

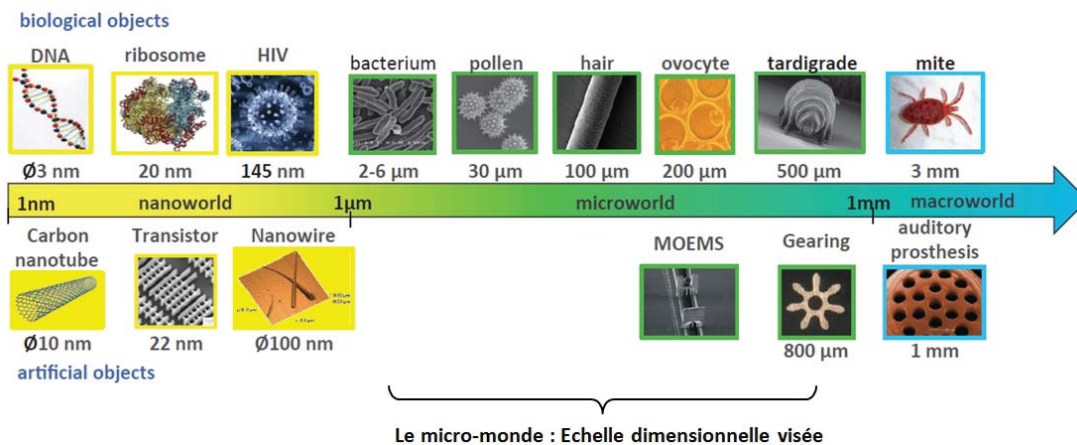


FIGURE 2.1 – Échelle dimensionnelle visée par mes travaux, graphique partiellement issu de [Régner, 2015].

Ces différents enjeux, objectifs et problématiques associés au manque de connaissances et d'outils pour les atteindre constituent les principales motivations de l'orientation de mes travaux de recherche vers l'étude et la réalisation de tâches complexes de micromanipulation et de micro-assemblage. Cette approche originale, développée dans la suite de ce document, vise à proposer des outils microrobotiques, développer leurs fonctionnalités, la capacité à effectuer des mesures les plus localisées possible ou à générer des déplacements complexes, précis et reproductibles ainsi que la capacité de manipuler ou d'assembler des micro-objets.

2.1.2/ APPROCHE MICROROBOTIQUE POUR LE MICRO-ASSEMBLAGE

La réalisation de tâches complexes de micromanipulation et de micro-assemblage consiste à déplacer un ou plusieurs micro-objets, à les orienter, à contrôler leurs positions et nécessite également de les caractériser, ou de contrôler les forces d'interaction. La microrobotique est partie intégrante de la robotique "macroscopique" mais se distingue toutefois par l'échelle dimensionnelle à laquelle elle s'applique. Par exemple, l'assemblage robotique et l'assemblage manuel sont tous deux possibles et leur choix résulte le plus souvent de compromis technico-économiques tandis que le micro-assemblage requiert, de manière quasiment inévitable, l'utilisation d'outils adaptés.

De nombreux travaux permettant la micromanipulation et le micro-assemblage sont présents dans la littérature, ils peuvent être classés selon deux approches principales :

- une approche descendante tendant à miniaturiser les outils et méthodes du macro-monde. Cette approche consiste généralement à déplacer des micro-objets en utilisant un porteur robotique et à les manipuler par des préhenseurs dits à contact (un contact mécanique est nécessaire entre l'organe terminal du robot et l'objet manipulé) ;
- une approche ascendante tendant à exploiter des effets physiques ou chimiques typiques du nano-monde. Cette approche consiste à générer des champs de forces (effets acoustiques, magnétiques, électriques, optiques par exemple) permettant de déplacer des micro-objets à distance et sans contact.

L'approche ascendante permet de manipuler simultanément de nombreux objets, induit des

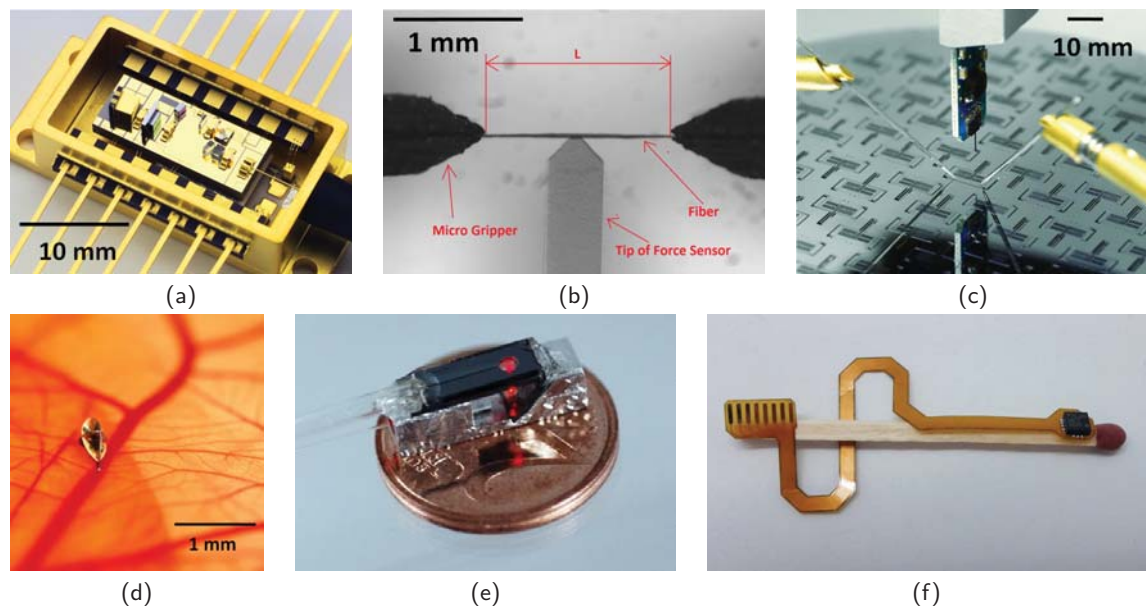


FIGURE 2.2 – Exemples d'applications à l'échelle micrométrique : (a) Micro-banc optique assemblé (société Américaine AXSUN) (b) Caractérisation mécanique de fibres naturelles (Université de Technologie de Tampere, Finlande) (c) Système de caractérisation électro-mécanique d'un microsystème (société Suisse Femtotoools) (d) Microrobot pour la chirurgie oculaire (ETH Zurich [Ullrich et al., 2013]) (e) Tête endoscopique OCT¹(IMTEK, Freiburg, Allemagne) (f) Accéléromètre implantable pour la surveillance du système cardiovasculaire humain (IMTEK, Freiburg, Allemagne).

dynamiques très rapides (seul le micro-objet est déplacé) et n'engendre pas de contamination de l'objet (pas de contact) ce qui est très utile pour des applications biologiques par exemple. Les déplacements et mouvements de l'objet dépendent très directement du réseau (d'électrodes, bobines...) générant les champs de forces et induisent à ce titre une conception relativement dédiée aux tâches à réaliser.

L'approche descendante, quant à elle, ne permet de manipuler qu'un objet à la fois (éventuellement un nombre très limité). Toutefois, cette approche offre une grande versatilité puisqu'il est possible de réaliser une grande diversité de mouvements et que la programmation de nouvelles trajectoire est simple et rapide. Par ailleurs, des forces importantes peuvent être appliquées ce qui s'avère très utile en micro-assemblage pour réaliser des tâches de collage ou d'insertion, par exemple, mais également pour la caractérisation et l'identification de paramètres de micro-objets ou de systèmes.

Ces deux approches comportent des challenges scientifiques et techniques importants et divers. Les travaux que j'ai pu conduire exploitent l'approche descendante pour les raisons majeures suivantes :

- la diversité et complexité des tâches qu'elle permet de réaliser ;
- un continuum recherche-transfert plus fort ;
- de nombreuses spécificités liées à l'échelle dimensionnelle (présentées en section 2.1.3) qui ouvre de très nombreuses possibilités pour des travaux originaux que ce soit en termes de conception, de modélisation, de commande ou de caractérisation

1. Acronyme Anglais de Tomographie à Cohérence Optique : technique permettant la visualisation tridimensionnelle de tissus.

2.1.3/ CHALLENGES DU MICRO-ASSEMBLAGE

L'échelle micrométrique (échelle dimensionnelle couverte par le micro-monde) possède plusieurs spécificités qui influencent particulièrement le comportement des systèmes, des objets manipulés ou des outils de manipulation. Comme nous allons le voir, ces spécificités ne permettent pas du tout une simple réduction homothétique des outils et principes de l'échelle macroscopique. En revanche, ces spécificités ouvrent de nombreuses perspectives originales, par exemple, des principes d'actionnement ou de mesure, des approches de modélisation, des structures de commande ou des stratégies d'assemblage. Les principales spécificités de cette échelle considérées dans un contexte de micro-assemblage sont les suivantes (et seront détaillées par la suite) :

- prédominance des forces surfaciques ;
- dynamique des systèmes importante ;
- influence forte des variations de paramètres de l'environnement ;
- difficultés de mesure ;
- usage répandu de matériaux actifs ;
- technologies de microfabrication en salle blanche répandues.

Prédominance des forces surfaciques :

La manipulation d'objets macroscopiques est relativement prévisible : un objet initialement saisi par une pince tombe lorsque celle-ci s'ouvre. Ce constat est dû aux forces volumiques, qui sont prépondérantes à cette échelle, mais il n'en va pas de même à l'échelle microscopique. En effet, la réduction homothétique des dimensions d'un objet d'un facteur 10 engendre une réduction de son volume d'un facteur 1000, tandis que la réduction de sa surface est d'un facteur 100. Ainsi, les forces proportionnelles au volume deviennent progressivement moins importantes, que les forces surfaciques lors de la réduction des dimensions des objets manipulés.

Les forces les plus influentes, dans un contexte de micromanipulation, sont les forces capillaires (présence de liquide entre deux composants), les forces électrostatiques (présence de charges) et les forces de van der Waals (interactions moléculaires) [Chaillet and Régner, 2010]. Ces forces font actuellement l'objet de nombreuses études dont très peu concernent des contacts surfaciques ou l'échelle micrométrique. Ces forces peuvent pourtant s'avérer très perturbantes lors de tâches de micromanipulation car elles agissent à distance (sans contact) ou au contact. Elles induisent un comportement erratique des composants rendant leur saisie (répulsion à distance) et leur dépose difficiles (effet de collage appelé pull-off), elles doivent donc être prises en compte. Cependant, le manque de modèles fiables, de connaissances et de reproductibilité des phénomènes sont sources d'incertitudes importantes ne permettant pas de les prévoir ou de les estimer correctement.

Dynamique importante des systèmes :

La dynamique des systèmes est généralement grande. Par exemple, la réduction homothétique des dimensions d'une poutre d'un facteur 10 induit une augmentation de sa fréquence naturelle d'un facteur 10. Dans ce cadre, établir un contact entre un outil de préhension et un micro-objet à manipuler peut typiquement induire une accélération de l'objet de plusieurs centaines ou milliers de fois l'accélération de la pesanteur. La manipulation de micro-objet requiert alors la prise en compte de cette dynamique pour éviter de perdre les composants à chaque prise et pour garantir une bonne précision de prise. La grande dynamique des microsystèmes induit, pour cet exemple, des difficultés mais peut à l'inverse être utilisée à bon escient (dynamique suffisante pour déposer un composant malgré la présence de forces d'adhésion).

Influence forte des variations de paramètres de l'environnement :

L'environnement des objets manipulés et systèmes de manipulation change avec le temps. Ces évolutions sont souvent négligées à l'échelle macroscopique mais deviennent très influentes à l'échelle micrométrique. Les principaux paramètres influents sont la température, la pression et l'hydrométrie et jouent un rôle même dans des environnements où ils sont contrôlés. Par exemple, un environnement contrôlé de type salle blanche, engendre une variation de la température d'1°C, ce qui engendre des déformations de plusieurs micromètres en raison de la dilatation thermique ou de la sensibilité particulière de certains matériaux actifs comme ceux piézoélectriques. Ce type de déformation peut ainsi typiquement atteindre des amplitudes du même ordre de grandeur que les objets à manipuler. D'un point de vue général, les variations des paramètres de l'environnement induisent des comportements très variés particulièrement difficiles à modéliser. Une attention particulière doit être apportée aux conditions de mise en œuvre pour les validations expérimentales et conduisent à préférer, lorsque cela est possible, une commande en boucle fermée.

Difficultés de mesure :

Mesurer des positions ou des forces constitue un enjeu majeur à l'échelle micrométrique que ce soit pour conduire des études de comportements, identifier des paramètres, quantifier des performances, réaliser des commandes en boucle fermée ou contrôler la position relative de deux composants à assembler. Cependant les performances recherchées imposent des résolutions et dynamiques élevées, de grandes plages de mesure, une sensibilité faible aux variations de l'environnement...réduisant drastiquement le choix de capteurs disponibles. Les capteurs commerciaux adaptés sont typiquement des interféromètres, des MEMS² analyseurs ou des outils de visualisation très puissants (microscopes optiques ou microscopes électroniques à balayage). Ceux-ci imposent néanmoins des contraintes fortes en raison de leur volume très conséquent, et ne permettent d'effectuer des mesures que selon une, voire deux directions de l'espace, alors que le contexte du micro-assemblage requiert bien souvent des mesures selon plusieurs directions. Effectuer des mesures exploitables nécessite donc généralement des protocoles de validation expérimentales complexes et permet d'obtenir le plus souvent des informations partielles, un niveau de bruit conséquent ainsi que des performances limitées.

Usage répandu de matériaux actifs :

La génération de déplacements et/ou l'application de forces à l'échelle micrométrique est très généralement effectuée par des matériaux actifs déformables insérés dans des structures déformables [Bellouard, 2009]. Les mouvements générés sont alors sans jeu et sans frottement ce qui est une condition recherchée pour de nombreuses applications. Cependant les principes physiques exploités (piézoélectrique, thermique, capacitif) induisent des comportements fortement non-linéaires, variés et subissent les variations des paramètres de l'environnement. Par ailleurs, la modélisation précise de leur comportement est un sujet d'étude encore très ouvert et conduit à privilégier des approches de commande en boucle fermée.

Technologies de microfabrication en salle blanche :

Les objets artificiels du micro-monde sont majoritairement réalisés par des technologies de microfabrication en salle blanche³ qu'il s'agisse de composants élémentaires (Figures 2.1.3(a), (c) et (d)), d'outils robotiques utilisés pour leur caractérisation (Figures (b) et (c)) ou de produits complexes et multifonctionnels (Figure 2.1.3(f)). Ces technologies consistent à utiliser un sub-

2. Acronyme Anglais pour Microsystème Electro-Mécanique.

3. Environnement où plusieurs paramètres sont contrôlés précisément comme la température, l'hygrométrie et la présence de poussières.

strat plan sur lequel différentes couches de matériaux vont être localement déposées ou gravées [Madou, 2002][Madou, 2011]. Les couches successives sont constituées de matériaux différents et donc de propriétés différentes (par exemple conductrices, isolantes, semi-conductrices...). Ces technologies permettent ainsi de réaliser de très nombreuses fonctions élémentaires (électrique, mécanique, optique, chimique), mais également de les combiner pour réaliser des systèmes complexes intégrant simultanément une structure déformable (donc sans jeu mécanique), des capteurs et des actionneurs. Elles constituent donc une approche privilégiée pour la réalisation de microrobots, de fonctions microrobotisées (préhension par exemple), mais également de composants artificiels intervenant dans les applications de la microrobotique.

Les technologies de microfabrication en salle blanche connaissent depuis plusieurs années un essor considérable. Cependant, la fabrication de composants passe par une succession de procédés élémentaires. Or, chacun d'entre eux possède de multiples facteurs influents, les maîtriser passe par la répétition de multiples essais et réglages. Par ailleurs, de nombreuses contraintes technologiques limitent les choix des matériaux, des formes réalisables ou rendent de nombreux procédés élémentaires incompatibles. Ce type de contrainte induit les problématiques et choix suivants :

- pour le prototypage de systèmes "simples" : les nombreux facteurs influents de chaque procédé élémentaire induisent des incertitudes conséquentes, des taux de réussite faibles, et des microsystèmes de performances éloignées des prévisions. Les limiter passe par des choix de conception fondés sur des procédés simples et de nombre faible. Pour donner des ordres de grandeur, les réalisations que nous avons effectuées ont nécessité entre 15 étapes élémentaires (cas des composants optiques présentés en section 3.2) jusqu'à 117 (cas de la plateforme actionnée et instrumentée présentée en section 5.4.3) ;
- pour le prototypage de systèmes "complexes" nécessitant la combinaison de plusieurs fonctions très différentes comme des fonctions optiques avec des actionneurs : ce type de réalisation requiert une prise de risque et des choix de microfabrication très complexes. Un nombre grandissant d'équipes de recherche choisissent d'utiliser des techniques de micro-assemblage pour limiter la complexité des procédés de fabrication à des composants élémentaires plus simples ;
- pour la réalisation de grandes séries de produits : un effort conséquent peut être effectué pour optimiser et maîtriser les différents procédés. Cependant, l'évolution des besoins vers des systèmes plus complexes engendre une multiplication des étapes élémentaires et réduit alors drastiquement les taux de microsystèmes conformes au cahier des charges recherché. Ici aussi, l'approche par assemblage est apparue et connaît maintenant un développement.

Synthèse des verrous et spécificités du micro-assemblage

Les différentes spécificités présentées ci-dessus sont synthétisées séparément dans le Tableau 2.1, mais font néanmoins apparaître des difficultés supplémentaires lorsqu'elles s'ajoutent. Par exemple, le comportement des objets et des systèmes du micromonde est complexe, variant, non-linéaire, fortement perturbable et difficile à modéliser et nécessite de favoriser une approche par commande en boucle fermée pour atteindre des performances souhaitées. Une telle commande requiert toutefois l'intégration de capteurs possédant des performances adaptées mais souvent impossibles. De même, le manque de reproductibilité des procédés de microfabrication induit des composants de caractéristiques différentes. Les caractéristiques obtenues sont difficiles à identifier par manque de moyens de manipulation ou de caractérisation. L'utilisation de tels moyens est, par ailleurs rendue complexe en raison de la prédominance des forces d'adhésion. Il devient alors très complexe d'établir une corrélation entre les paramètres de fabrication et les caractéristiques des composants fabriqués.

TABLE 2.1 – Synthèse des verrous et spécificités du micro-assemblage.

Verrous et spécificités	Conséquences pour la réalisation de tâches de micro-assemblage
Prédominance des forces surfaciques	Comportement des objets erratique et à grande dynamique, effets de collage aux contacts, manque de modèles exploitables
Dynamique importante des systèmes	Difficultés de saisir précisément un objet, difficultés d'étude ou de commande
Influence forte des variations des paramètres de l'environnement même en environnement contrôlé	Comportement des objets et systèmes variant fortement et rapidement, difficultés de validations expérimentales
Difficultés de mesure	Difficultés d'observer et de caractériser des comportements ou des phénomènes influents, de mesurer la position d'un composant à assembler, protocoles de mesures complexes, difficulté d'intégrer des capteurs et donc de mettre en œuvre des commandes en boucle fermée
Usage répandu de matériaux actifs	Comportements non-linéaires et complexes difficiles à modéliser précisément
Usage des technologies de microfabrication en salle blanche répandu	Grandes incertitudes de fabrication, caractéristiques des matériaux spécifiques et complexes à identifier

Les problématiques, les plus importantes liées à l'échelle micrométrique considérée, sont la présence des forces surfaciques source d'un comportement erratique des composants, de dynamiques importantes, d'un manque d'outils robotiques adaptés à la manipulation de micro-objets et de limites des procédés de microfabrication. Celles-ci induisent un manque de connaissance fort, de grandes incertitudes et donc une difficulté de prévoir un comportement ou pour réussir à contrôler la manipulation d'un composant. Elles auront une influence forte sur les étapes de conception, de modélisation, d'identification, de commande ou de caractérisation, qui induiront une méthodologie générale de travail spécifique et de choix originaux (principes de mesure, d'actionnement, stratégies d'assemblage...) qui seront présentés en section 2.2.

2.2/ STRUCTURATION DE L'ACTIVITÉ

2.2.1/ THÉMATIQUES SCIENTIFIQUES

L'objectif global de mes travaux est d'étudier le comportement des systèmes à l'échelle micrométrique pour proposer des solutions originales permettant de réaliser avec succès des tâches de micro-assemblage complexes et précises. La section précédente (2.1.3) a mis en évidence de nombreuses spécificités associées à un manque de connaissance important. Aussi, mes travaux ont débuté par une première thématique (entre 2006 et 2010) visant à étudier plus en détail les différentes problématiques du micro-assemblage automatisé et précis. Ces travaux ont conduit à identifier trois verrous particulièrement clés faisant l'objet de la seconde phase des travaux (conduits depuis 2010 à aujourd'hui). La Figure 2.3, présente ces deux phases ainsi que les quatre thématiques étudiées qui sont les suivantes et qui seront détaillées ci-après (notons que la section 2.2.2 présentera le déroulement temporel plus détaillé en incluant les co-encadrements, projets et collaborations) :

- étude des différentes problématiques et approches du micro-assemblage complexe et précis ;
- étude de robots porteurs, qu'il s'agisse de la quantification des performances des systèmes de micro et nano positionnement, de l'étude des facteurs influents ou de l'amélioration de

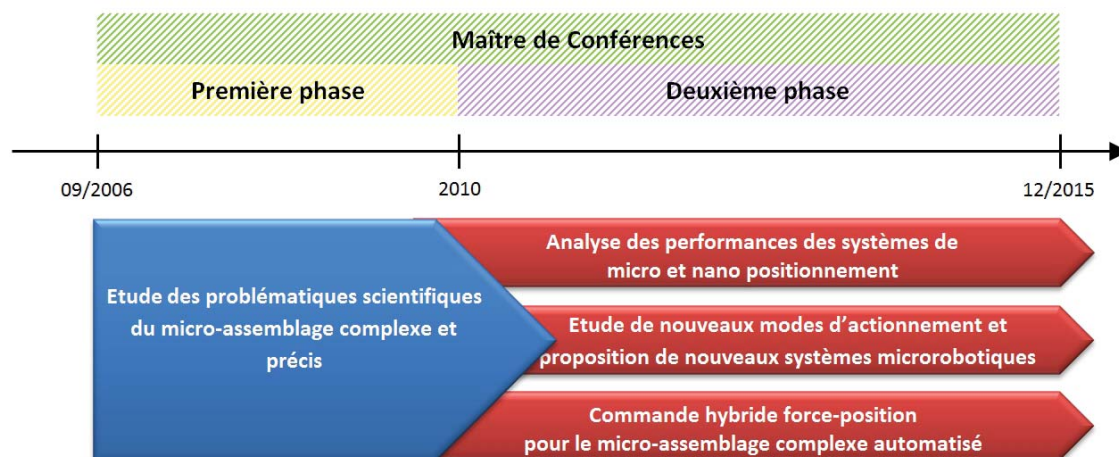


FIGURE 2.3 – Principaux axes de recherche de mon activité.

leurs performances ;

- étude et proposition de nouveaux modes d'actionnement de performances particulièrement accrues, puis de nouveaux systèmes microrobotiques intégrés et instrumentés tels qu'une micropince ou des plateformes actionnées ;
- étude de structures de commande et de stratégies de micro-assemblage pour automatiser avec succès des tâches de micro-assemblage complexes et précises.

Thématique 1 : étude des problématiques scientifiques du micro-assemblage complexe et précis :

La réalisation de tâches complexes et précises de micro-assemblage nécessite d'étudier de nombreux verrous (cf section 2.1.3). Ce premier axe de recherche visait à conduire différentes études pour identifier les problématiques les plus importantes et l'impact respectif de chacune. Un premier point clé a porté sur l'étude du comportement des micro-objets et nous a conduit à étudier plus spécifiquement la force de pull-off qui apparaît lors de chaque contact mécanique entre un composant manipulé et son préhenseur ou entre deux composants à assembler. Nous avons pu montrer que cette force a des effets importants sur le micro-assemblage, puisqu'elle induit un effet de collage, qui ne permet plus de contrôler précisément des déplacements relatifs entre deux composants une fois en contact. Ce type de contact est particulièrement complexe à maîtriser compte tenu de l'emploi de matériaux actifs (préhenseurs, porteur robotique), de la sensibilité importante à l'environnement, du manque de connaissance du comportement des micro-objets, du manque de modèles fiables ou des difficultés à intégrer des capteurs. Pour proposer des solutions à ce verrou, nous avons mené différents travaux complémentaires relatifs à la modélisation multiphysique du comportement des préhenseurs, à la prise en compte d'information de forces de contacts, à la définition de stratégies d'assemblages originales et de modes de commande pour leur mise en œuvre. Nous avons ainsi pu réaliser des tâches de micro-assemblage complexe par mode téléopéré, puis par asservissement visuel avec le suivi CAO du composant manipulé et enfin par commande référencée force pour contrôler les forces d'interaction.

Les différents travaux réalisés à travers ce premier axe de recherche ont alors permis d'établir :

- les trois axes de recherche étudiés pendant la seconde phase de mes travaux (période 2010-2015) et présentés ci-après ;
- une méthodologie de travail permettant de composer avec de très nombreuses sources d'in-

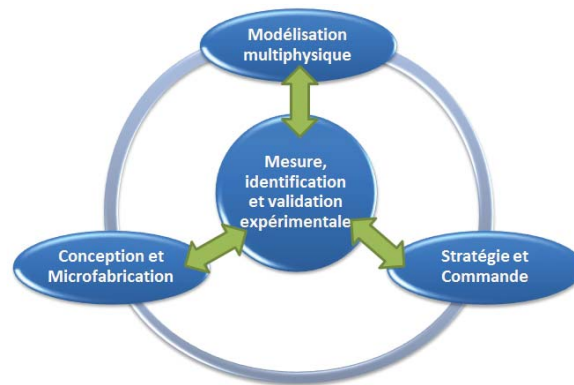


FIGURE 2.4 – Méthodologie générale de travail où la validation expérimentale prend une place centrale en raison du manque de connaissance du comportement des micro-objets et systèmes miniatures.

certitude et de très nombreuses hypothèses, un soin important a été apporté à leur vérification même si cela fut particulièrement complexe (voir le principe utilisé en Figure 2.4).

Thématique 2 : analyse des performances des systèmes de micro et nano positionnement :

La première phase des travaux, conduite entre 2006 et 2010, nous a montré que la réalisation de tâches complexes de micro-assemblage passe souvent par la mise en œuvre d'un porteur robotique de cinématique particulièrement complexe. En effet, la combinaison de systèmes commerciaux de micro et de nanopositionnement⁴ est une pratique répandue et actuellement sans réelle alternative. Elle induit de très nombreuses redondances cinématiques mais surtout une accumulation des défauts géométriques et non géométriques affectant la précision de positionnement de l'organe terminal du robot. Malgré leur usage répandu, le comportement des systèmes de micro et nanopositionnement reste particulièrement mal connu pour différentes raisons :

- manque de moyens de mesure multi-DDL (Degrés De Libertés) et à rapport plage de mesure/résolution suffisant. Ce manque rend difficile la quantification des performances des porteurs robotiques ou l'étude des facteurs influents ;
- comportement de ces systèmes actuellement très mal connu car ces technologies sont récentes (nous venons de fêter les 25 ans de la microrobotique) et conçues selon des objectifs particuliers visant à maximiser la résolution et la compacité. ;
- influence forte et simultanée de défauts généralement négligés tels que le poids, les erreurs intrinsèques à chaque axe, la sensibilité à l'environnement...

Ces différentes problématiques ne permettaient pas de bénéficier des outils et méthodes de la robotique macroscopique, aussi, nous avons souhaité approfondir et comprendre le comportement de ces systèmes de micro et nanopositionnement. Nous nous sommes penchés, en premier lieu, sur la problématique de la mesure en étudiant un principe de mesure visuel multi-DDL associé à des motifs répétitifs. Ces travaux ont conduit à un rapport plage/résolution unique

4. Les travaux conduits nous ont amenés à considérer deux familles technologiques différentes. D'une part, les systèmes de micropositionnement que nous définissons comme des systèmes à guidage mécanique, permettant de grandes courses (quelques mm ou dizaines de mm) mais de mauvaises précisions. D'autre part, les systèmes de nanopositionnement que nous définissons comme des systèmes à structures déformables sans jeu mais de petites courses (quelques centaines de μm maximum) mais de très bonnes résolutions.

pour l'échelle micrométrique (10^6) ce qui nous a permis d'observer et de quantifier des défauts les plus influents qu'ils soient intrinsèques aux axes ou à leur assemblage. Cette analyse, réalisée grâce à une approche par étalonnage robotique, nous a permis de comprendre l'influence relative de chaque défaut mais également de proposer une métrique adaptée à l'échelle micrométrique. Une amélioration notable de la précision des porteurs robotique a ainsi pu être obtenue de même qu'une méthodologie d'étalonnage adaptée au contexte du micro-assemblage.

Thématique 3 : étude de nouveaux modes d'actionnement et proposition de nouveaux systèmes microrobotiques :

La réalisation de tâches complexes de micro-assemblage passe par la réalisation de mouvements complexes et précis. Nous venons de voir, que nombre d'études induisent un porteur robotique de cinématique complexe pour générer ces déplacements avec une accumulation de défauts et donc au détriment de la précision. Aussi, nous avons souhaité créer un nouvel axe de recherche afin d'offrir une alternative à cette approche en cherchant à proposer des systèmes les plus compacts possibles. Pour nourrir cette nouvelle approche, nous avons choisi de mettre en synergie, d'une part, l'emploi de matériaux actifs, et d'autre part, les technologies de microfabrication en salle blanche.

Ces travaux ont conduit à l'étude de nouveaux modes d'actionnement exploitant l'effet piézoélectrique répandu à l'échelle micrométrique pour les nombreux avantages qu'il présente : densités de force conséquentes, grandes résolutions et dynamiques, comportement prévisible, fabricabilité par les technologies salle blanche. Malgré de nombreuses études, des limites fortes résident dans l'amplitude des déplacements générés, la diversité des mouvements générés ainsi que certains compromis entre amplitude de déplacement, dynamique et compacité. Aussi, nous avons choisi d'étudier deux voies complémentaires visant à proposer de nouveaux modes d'actionnement de performances notablement accrues tant pour intégrer des actionneurs dans des MOEMS⁵ assemblés que dans des outils robotiques (préhenseurs, substrats). La première voie est relative à l'étude et la mise en œuvre d'un matériau relativement récent et encore mal connu (le PMN-PT) pour les MOEMS. La seconde porte sur un procédé de fabrication de structures multi-couches constituées de films piézoélectriques épais.

Cet axe de recherche nous a également conduit à proposer de nouveaux systèmes microrobotiques intégrés, à savoir une micropince instrumentée et des substrats actionnés et instrumentés. Ces deux types de systèmes ont pour but d'apporter au plus près des composants manipulés, des capacités de déplacements et de mesures locales, tous deux utiles à la réalisation de mouvements complexes et précis.

Thématique 4 : commande hybride force-position pour le micro-assemblage complexe automatisé :

L'objectif de ce dernier axe scientifique est de réaliser la commande d'une plateforme de micro-assemblage, afin de réaliser des tâches de micro-assemblage complexes et précises, en composant avec les différentes spécificités présentées en section 2.1.3. Les travaux se sont concentrés sur une approche par commande hybride force-position, visant à contrôler la position du composant à assembler, ainsi que certaines forces de contact qui jouent un rôle très particulier à l'échelle micrométrique en raison de la présence de force de pull-off (adhésion lors des contacts), des grandes dynamiques en jeu et des nombreuses sources d'incertitudes. Ces spécificités nous ont amené à apporter un soin particulier aux transitions contacts/non-contacts en proposant une modélisation dynamique non-linéaire du comportement du préhenseur et nous ont conduit à étudier des stratégies d'assemblage spécifiques. Une structure de commande robuste combi-

5. Acronyme anglais pour MicroSystèmes Opto-Electro-Mécaniques.

nant différents types de commande hybride force-position a alors été étudiée et mise en œuvre avec succès pour la réalisation de tâches complexes et automatisées de micro-assemblage.

Définition d'objets d'étude :

Les thématiques scientifiques présentées ci-dessous possèdent des articulations et certains dénominateurs communs. Par exemple, la problématique de la mesure est relativement générique et constitue un objet d'étude utile à plusieurs thématiques. La Figure 2.5 recense les différents objets d'étude constituant mon activité scientifique globalement orientée vers l'objectif de la réalisation de tâches de micro-assemblage complexes, précises et automatisées.

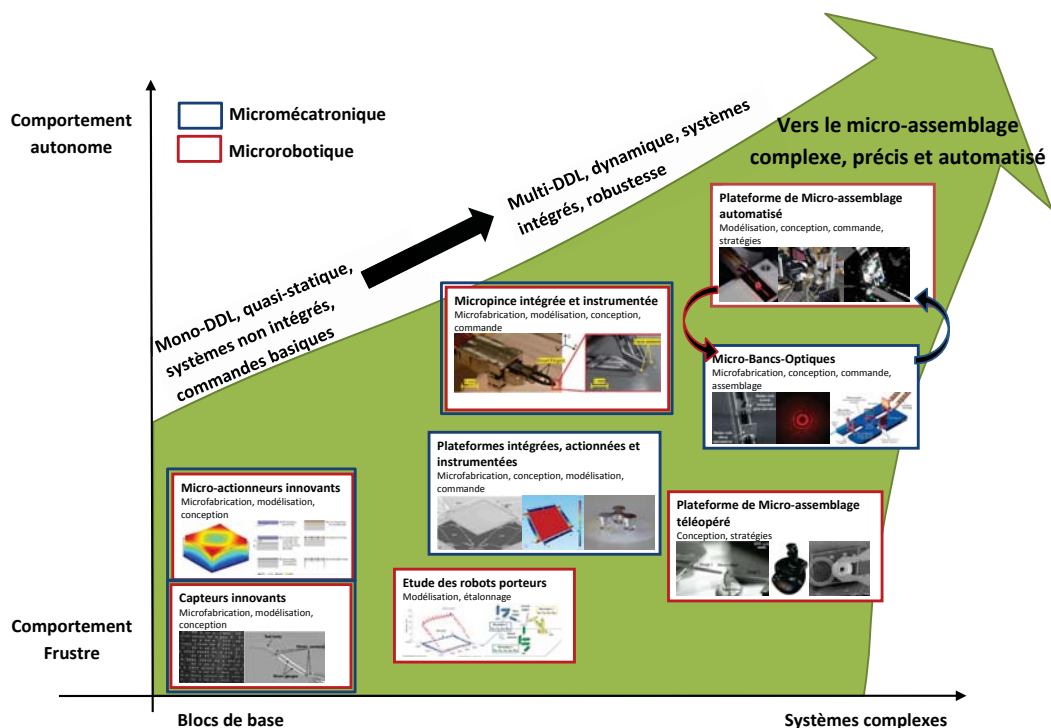


FIGURE 2.5 – Principaux objets d'étude de mon activité scientifique contribuant au micro-assemblage complexe et précis. Chaque bloc constitue un objet d'étude mettant en œuvre différents outils explicités en sous-titres. Les liens entre objets d'études ne sont pas explicités sur ce graphique pour faciliter sa lisibilité mais tous les objets d'études "complexes-autonomes" reposent sur l'ensemble des objets d'études plus élémentaires.

2.2.2/ SÉQUENCEMENT DE L'ACTIVITÉ

La Figure 2.6 présente le déroulement temporel des quatre thématiques scientifiques que j'ai pu conduire. Elle recense notamment les principaux projets qui ont supporté ces thématiques, les différents co-encadrements que j'ai effectué ainsi que les principales collaborations. Les détails de ces projets et encadrements sont explicités en annexes 9 et 10. De même la Figure 2.7 explicite les différentes publications issues de ces différents travaux.

Face à l'étendue et à la diversité des problématiques à considérer pour étudier le micro-assemblage complexe et précis, mes activités de recherche ont débuté par une analyse de

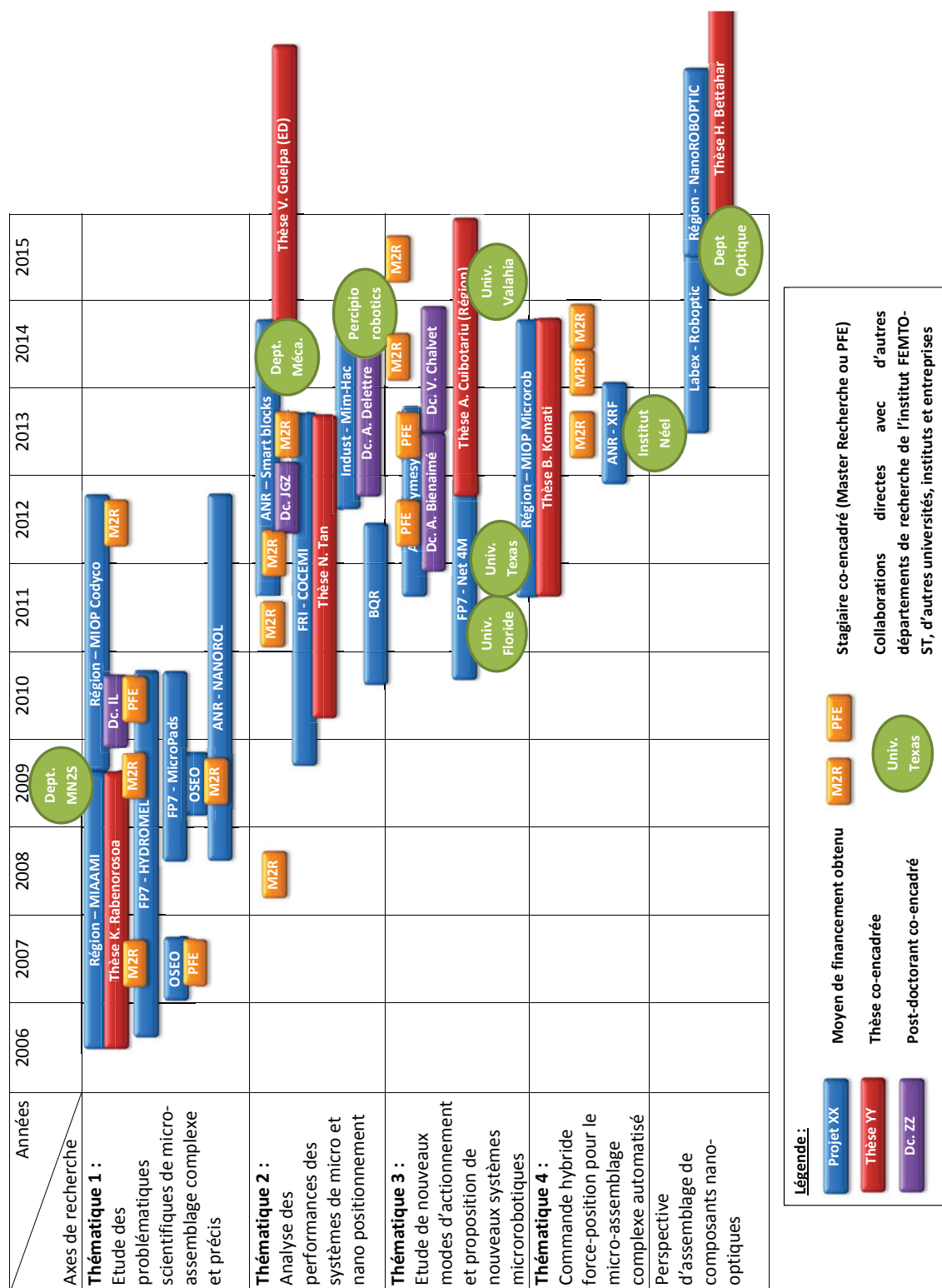


FIGURE 2.6 – Déroulement temporel des quatre thématiques scientifiques incluant les co-encadrements effectués, projets soutenant ces thématiques et principales collaborations ayant contribué à ces thématiques.

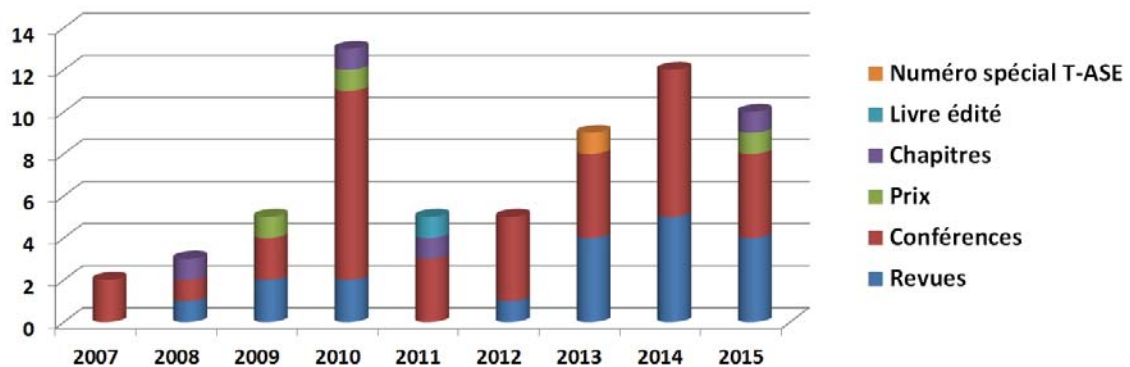


FIGURE 2.7 – Publications en revues (3 T-Mech, 2 T-ASE, 4 JMM, 3 IJO, 2 JMBR, 2 AA, Sensors, Mechatronics, MNL) en conférences (8 ICRA, 7 AIM, 5 IROS, 4 IDETC, 4 ISOT, 3 IDETC...), prix (2 prix de thèse et un award de conférence), ouvrages (5 chapitre et un livre édité) et co-édition d'un numéro spécial de revue issus de l'activité scientifique.

la littérature, aboutissant à deux constats clés qui ont fortement orienté les travaux que j'ai conduit.

Le premier constat, réalisé en 2006, montre que très peu d'études portent sur le micro-assemblage complexe et que face à la multitude des problématiques en jeu, les équipes de recherche étudient des approches très différentes. Les travaux conduits se caractérisent par un manque de repères scientifiques et comportent une prise de risque dans le choix des problématiques étudiées et leurs approches. La première décision, que nous avons prise, était de miser sur une approche par préhenseur actif exploitant l'effet piézoélectrique. Ce choix a visé, d'une part à positionner les travaux de manière originale internationalement, a ouvert des perspectives uniques et s'est reposé sur un socle fort de compétences locales.

Le second constat est que la majorité des équipes de recherche mettaient en œuvre des tâches de micromanipulation de composants élémentaires, comme des billes. Quelques équipes, en revanche, s'étaient orientées vers des domaines applicatifs et conduisaient des études en utilisant des composants plus complexes. Elle devaient alors prendre en compte un cahier des charges riche, comme le niveau de précision attendu, le nombre de sous-systèmes et de degrés de libertés à considérer simultanément ainsi que le séquençement des étapes d'assemblage. La seconde décision importante, que nous avons prise, était de retenir cette approche, bien que plus contraignante, elle offre un contexte permettant de conduire des études plus approfondies. Nous avons alors choisi un cas d'étude de type MOEMS (présenté en section 3.2 du chapitre 3) offrant simultanément un cahier des charges riche, générique, ainsi qu'un potentiel applicatif.

Ces deux choix clés ont été effectués simultanément, car ils possèdent une interdépendance forte. L'idée est de créer une synergie entre assembler un composant complexe qui permettrait de mieux comprendre les problématiques du micro-assemblage, et, dans l'autre sens, proposer des outils et des méthodes de micro-assemblage permettrait de proposer des systèmes miniatures et originaux. Ces décisions nous ont permis de commencer à étudier, dans le détail, les différentes problématiques du micro-assemblage complexe et à établir une première collaboration importante avec le département MN2S⁶ (équipe de Christophe GORECKI). Celle-ci a débuté par un projet régional permettant le financement de la thèse de Kanty Rabenorosoa que j'ai co-encadré ainsi que du post-doctorat de Sylwester Bargiel. Ces deux recrutements ont contribué à mettre en place la synergie recherchée et ont conduit à la proposition du concept

6. Département Micro Nano Sciences et Systèmes de l'institut FEMTO-ST.

de micro-banc optique modulaire (choisi comme cas d'étude d'assemblage pour la majorité des travaux que j'ai conduit) et à la réalisation des premiers micro-assemblages complexes. Ils ont notamment permis de comprendre toute l'importance des forces de contact notamment le pull-off, l'importance de modèles multi-physiques permettant de considérer les aspects dynamiques et non-linéaires et de définir des stratégies d'assemblages et de commandes originales en raison de l'échelle micrométrique étudiée.

Ces différents travaux réalisés entre 2006 et 2010 ont été très bien valorisés puisqu'ils ont conduit à identifier les trois thématiques scientifiques étudiées lors de la seconde phase de mes travaux (période allant de 2010 à 2015), mais aussi parce qu'ils ont conduit à plusieurs publications fortes et au prix spécial d'ISAM 2009 (International Symposium on Assembly and Manufacturing). Il est également important de noter qu'un travail d'incubation a débuté en 2009 conduisant à la création de l'entreprise Percipio Robotics. L'objet principal de cette entreprise est de commercialiser des plateformes de micro-assemblage, ainsi, une partie de mes travaux a pu faire l'objet d'un transfert industriel (voir section 7.2 du chapitre 7).

En 2010, nous avons pu commencer à étudier le second axe de recherche (voir Chapitre 4) de mes travaux grâce à l'obtention du projet COCEMI, que j'ai coordonné. Ce projet a servi de support à la thèse de Ning TAN, que j'ai co-encadré, et avait pour but d'étudier le comportement et la commande des systèmes micro et nano robotiques. Ces premiers travaux ont ensuite contribué à l'obtention d'un projet de collaboration entre AS2M⁷ et une entreprise. Ce second projet, que j'ai également coordonné, a permis de proposer un porteur robotique capable de réaliser des mouvements rapides et précis dans un volume de travail conséquent (post-doctorat d'Anne Delettre). Le projet COCEMI a également conduit à établir une collaboration avec Patrick Sandoz (département de Mécanique de l'Institut FEMTO-ST) aboutissant aux travaux de mesure visuelle par mires codées. Cette collaboration se traduit aujourd'hui par le co-encadrement de la thèse de Valérian Guelpa, dont le but consiste notamment à généraliser le principe pour réaliser des mesures spatiales.

Le troisième axe de recherche a également débuté en 2010 (voir Chapitre 5). Celui-ci vise à proposer de nouveaux principes d'actionnement et de nouveaux systèmes microrobotiques intégrés et instrumentés et a permis d'établir des collaborations intéressantes avec les Universités Américaines de Floride et du Texas ainsi qu'avec l'université Roumaine de Valahia. Une première alternative a été étudiée à travers les post-doctorats d'Alex Bienaimé puis de Vincent Chalvet qui ont étudié les structures multicouches actionnées fondées sur des films piézoélectriques épais. Une seconde alternative a conduit à l'étude du PMN-PT (matériau piézoélectrique) grâce à la thèse, en cours, d'Adrian Cuiotariu. Ces travaux ont conduit à des actionneurs et systèmes particulièrement performants en regard de la littérature.

Enfin, le dernier axe de recherche a débuté en 2011 dont le but majeur est d'étudier les problématiques de commande hybride force-position pour réaliser des tâches complexes et automatisées. Ces travaux se sont principalement déroulés avec la thèse de Bilal Komati, que j'ai co-encadré, et qui a conduit à proposer une structure de commande et une stratégie d'assemblage originale. Ces travaux ont permis à Bilal de recevoir le prix de thèse du GDR Robotique (prix des thèses soutenues en 2014). Ils ont également conduit au projet nano-Robotique que je coordonne. Ce projet collaboratif entre les départements AS2M et optique de FEMTO-ST porte sur l'étude de l'assemblage de composants nanophotoniques in-situ MEB (Microscope Électronique à Balayage) et finance la thèse de Houari Bettahar.

7. Département "Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques" de L'institut FEMTO-ST.

2.2.3/ CONTEXTE COLLABORATIF DES TRAVAUX

Les travaux conduits mettent en œuvre un spectre de compétences très large nécessaire à l'étude de problématiques de recherche en microrobotique et en micromécatronique. Celles abordées sont particulièrement pluridisciplinaires et typiques de l'approche "système". Elles portent notamment sur la mesure, la modélisation multiphysique, l'actionnement, la commande, la transformation de mouvements, l'intégration ou le choix de stratégies d'assemblage...

Ces caractéristiques ont toujours été source de nombreux apprentissages, de remises en cause, de discussions et de choix possibles. Dans ce cadre, j'ai toujours apporté une grande importance aux échanges avec les collègues conduisant à plusieurs collaborations fructueuses.

Par ailleurs, les travaux effectués se sont déroulés dans un contexte local, qui a beaucoup évolué ce qui n'a pas été sans influence sur mes activités. En effet, mes travaux ont débuté au sein du Laboratoire d'Automatique de Besançon, qui a intégré l'institut FEMTO-ST en 2008 pour devenir le département AS2M (Automatique et Systèmes Micromécatroniques). Au sein d'AS2M, de nombreuses évolutions ont également eu lieu, initialement, l'équipe SAMMI (Systèmes Automatisés de Micromanipulation et de Micro-Assemblage) fédérait l'ensemble des activités conduites à l'échelle micrométrique. En raison de sa taille devenue trop conséquente, cette équipe s'est ensuite divisée en plusieurs thématiques de recherche en 2009. J'ai ainsi pu être responsable du thème "systèmes mécatroniques et adaptroniques" qui fédérait l'activité de 12 permanents entre 2009 et 2011. Ces thèmes ont amené la construction actuelle du département, notamment la création de l'équipe CODE "COntrol DEsign" à laquelle j'appartiens aujourd'hui.

Les évolutions nombreuses et conséquentes (modification du périmètre ou intégration d'autres départements par exemple), qu'à connu l'institut FEMTO-ST, ont ouvert de nombreuses possibilités de collaborations et de synergies : ouverture de nouvelles discussions, création de moyens communs lourds comme la centrale de technologie Mimento pour la microfabrication en salle blanche, mais également une politique de soutien à des axes scientifiques transverses. Nous avons ainsi pu établir les collaborations locales suivantes :

- département MN2S, équipe de Christophe Gorecki, expertise en optique intégrée amenant notre collaboration relative aux micro-bancs optiques assemblés et à l'axe transverse "Microsystèmes pour l'instrumentation optique sur puce" au sein de FEMTO-ST ;
- département de mécanique, Patrick Sandoz, expertise en optique amenant des travaux communs sur la mesure par mires codées ;
- département d'optique, Nadège Courjal et Maria Pilar-Bernal, expertise en photonique amenant des travaux communs relatifs à l'assemblage de composants nano-optiques ;
- société Percipio Robotics, start-up de notre département, expertise industrielle en micro-assemblage permettant une synergie recherche-transfert sur des problématiques de micro-assemblage.

Outre ces collaborations locales, plusieurs collaborations internationales ont été effectives et ont permis de bénéficier d'expertises complémentaires. Celles-ci sont listées ci-dessous et détaillées en annexe 9.1.6 :

- université de Floride (USA), équipes de Gloria J. Wiens et de Huikai Xie, expertises en systèmes compliant et MOEMS, qui ont permis d'étudier des plateformes instrumentées ;
- université du Texas (USA), équipe de Dan Popa, expertise en micro-assemblage par préhenseur passif complémentaire à notre approche par préhenseur actif ;
- université Libre de Bruxelles (Belgique), Pierre Lambert, expertise relative aux effets de ten-

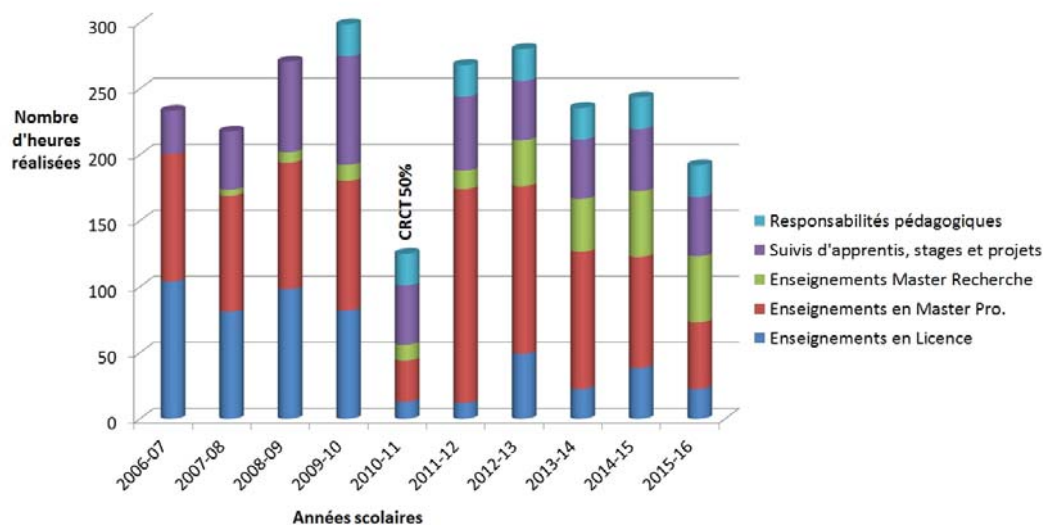


FIGURE 2.8 – Service d’enseignement effectué illustrant la part grandissante d’enseignements en master recherche due à la création de nouveaux contenus et aux transferts recherche-enseignement.

sion de surface, qui a conduit à des travaux communs relatifs à une plateforme intégrée conforme originale ;

- université de Valahia (Roumanie), Dinu Coltuc, expertise en matériaux actifs, conduisant à la thèse en co-tutelle d’Adrian Cuibotariu ;
- université de Liberec (République Tchèque), Vladimir Hotar, expertise en vision pour les environnements difficiles conduisant à des travaux d’assemblage par asservissement visuel.

Les collaborations mentionnées ici sont celles, qui ont conduit à des travaux de fond, dans la durée et ont induit des publications communes. De nombreux autres partenaires permettent également des échanges intéressants même s’il ne sont pas listés ici.

2.2.4/ ACTIVITÉS D’ENSEIGNEMENT

Étant enseignant-chercheur, mes activités d’enseignement ont joué un rôle important dont une partie était en lien direct celles de recherche. Ces activités d’enseignement sont détaillées en annexe 9.2, les principaux points sont les suivants :

- responsabilité pédagogique du master SAPIAA⁸, master en apprentissage qui repose sur un socle de compétences en automatique. Ce master contribue à un lien Franche-Comté/Bourgogne dans le cadre du PRES et de la COMUE et m’a conduit à être vice-président de la commission compétence et innovation du pôle de compétitivité Vitagora ;
- enseignements disciplinaires en automatique séquentielle, continue, mécatronique, en mettant en œuvre pour certains une pédagogie par projets ;
- enseignements en master recherche en synergie avec la recherche. La proportion de ces enseignements dans mon service statutaire n’a cessé de progresser (voir Figure 2.8) en raison de créations de nouveaux contenus pédagogiques issus d’un transfert recherche-enseignement présenté plus en détail au chapitre 7.

8. Systèmes Automatisés de Production dans les Industries Agro-Alimentaires.

2.3/ ORGANISATION DU MANUSCRIPT

Les travaux conduits ont pour objectif final d'étudier la réalisation de tâches de micro-assemblage complexes, précises et automatisées. Pour cela, le Chapitre 3 porte sur l'étude des problématiques scientifiques de cet objectif et conduisent à définir trois axes de recherche présentés dans les trois chapitres suivants. Ainsi, le Chapitre 4 permet d'étudier les robots porteurs, qu'il s'agisse de la quantification des performances des systèmes de micro et nano positionnement, de l'étude des facteurs influents ou de l'amélioration de leurs performances. Le chapitre 5 consiste, quant à lui, à étudier et à proposer de nouveaux modes d'actionnement de performances particulièrement accrues, puis de nouveaux systèmes microrobotiques intégrés et instrumentés tels qu'une micropince ou des plateformes actionnées. La dernière thématique scientifique est présentée au Chapitre 6 et porte sur l'étude de structures de commande et de stratégies de micro-assemblage permettant d'automatiser avec succès des tâches de micro-assemblage complexes et précises.

Le Chapitre 7 présente la synergie, que j'ai pu créer, entre activités de recherche scientifique, d'enseignement et de transfert industriel. Les conclusions et perspectives générales de l'ensemble de mes travaux sont présentées dans le Chapitre 8 suivi de l'annexe 9 présentant mon CV détaillé et l'annexe 10 listant les publications issues de mes travaux.

PROBLÉMATIQUES SCIENTIFIQUES

Ce chapitre expose les travaux réalisés entre 2006 et 2010 portant sur l'analyse de différentes approches du micro-assemblage. Cette première phase de mes travaux visait à identifier les thématiques scientifiques majeures à étudier pour permettre la réalisation de tâches de micro-assemblage complexes et précises. Un état de l'art relatif à l'approche descendante (préhension à contact) nous a conduit à retenir un principe de préhension fondé sur des matériaux actifs pour l'originalité, la versatilité et la précision induites. Nous avons également choisi de développer simultanément le concept de micro-banc optique permettant de réaliser une nouvelle génération de MOEMS. Ce banc optique est alors utilisé, comme cas d'étude, pour étudier différentes approches du micro-assemblage : téléopéré, automatisé par asservissement visuel et automatisé par commande hybride force position. Ces travaux ont conduit à différents résultats originaux comme la mesure multi-DDL de la position de composants sub-millimétriques, la mesure de forces d'interaction lors de contacts adhérents, ainsi que la proposition de stratégies de micro-assemblage. Une discussion finale des différents résultats obtenus conduit à identifier trois thématiques scientifiques, qui ont été étudiées dans la seconde phase de mes travaux (2010 à aujourd'hui) et qui seront présentées dans les chapitres 4, 5 et 6.

3.1/ APPROCHES DU MICRO-ASSEMBLAGE ROBOTISÉ

Les industriels de la micro-électronique exploitent couramment deux approches permettant d'assembler des micro-composants pour réaliser de très grandes séries de produits miniaturisés. La première exploite un principe de préhension par dépression, qui permet la manipulation de composants élémentaires de dimensions supérieures à 200 μm environ. Compte-tenu des temps de cycle très courts et des contacts outil-composant rigides, les composants manipulés peuvent être endommagés ou rayés. La seconde approche repose sur l'assemblage de plusieurs wafers : chacun comporte une matrice d'éléments de base, qui forment après assemblage, des produits multicouches plus complexes. La réalisation de produits complexes requiert d'une part, un nombre important de wafers et, d'autre part des procédés complexes pour fabriquer chacun d'entre eux. Cela induit sur chaque wafer des éléments de base non fonctionnels. L'assemblage des différents wafers engendre alors de très nombreux produits inexploitable. Ces deux approches mettent en œuvre des machines spéciales, dédiées et très productives. Pour cela, elles intègrent des capteurs associées à des commandes en position très performantes, ainsi que des structures mécaniques particulièrement optimisées. Par ailleurs, ces approches mettent en œuvre des types de tâches, formes et dimensions de composants permettant d'éviter la majorité des spécificités du micro-assemblage explicitées en section 2.1.3.

Ces moyens industriels ne permettent toutefois pas d'assembler des composants en petites

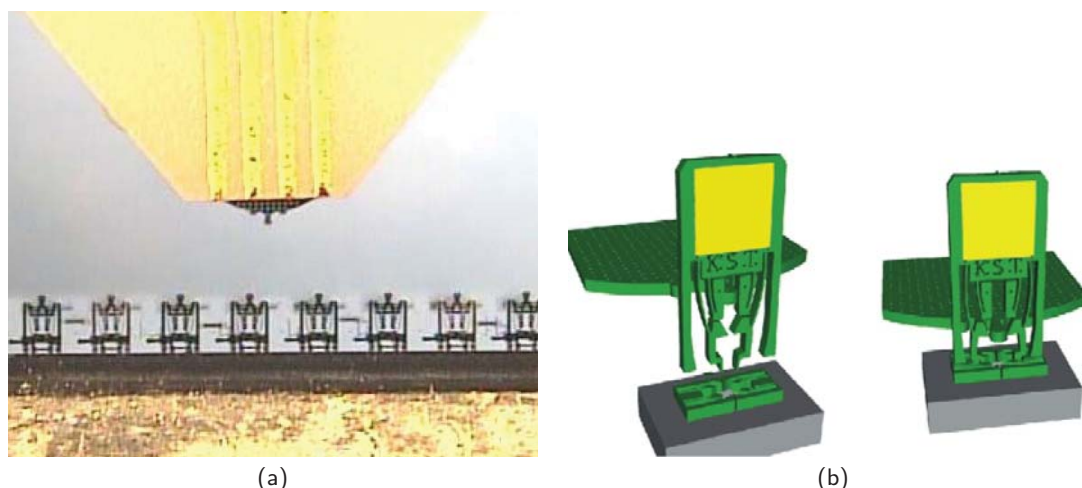


FIGURE 3.1 – Principe de préhension passif par clips mécaniques : (a) concept illustrant la prise d'un composant puis son insertion sur un substrat (b) composants assemblés [Das et al., 2007b].

séries, ni des composants complexes ou de petites dimensions. Par ailleurs, les spécificités du micro-assemblage explicitées en section 2.1.3 induisent des verrous scientifiques, qui motivent de nombreux travaux. Ce chapitre ne vise pas à dresser une liste exhaustive de ces différents travaux, mais va présenter des points particulièrement clés, tous aboutissant à la réalisation de tâches de micro-assemblage complexes ou précises. Ainsi, nous nous intéresserons, dans un premier temps, aux types de préhenseurs puis à des exemples de travaux majeurs de micromanipulation ou de micro-assemblage automatisés réalisés par commande en boucle ouverte, par commande référencée force ou par asservissement visuel.

3.1.1/ PRINCIPES DE PRÉHENSION

La manipulation de micro-objets requiert, avant toute chose, de développer un préhenseur adapté. Compte-tenu de l'ensemble des problématiques à considérer, de très nombreux types de préhenseurs ont été proposés dans la littérature [Lang, 2008]. Nous pouvons les classer en trois catégories : les préhenseurs dits passifs, les préhenseurs intégrés actifs à deux doigts de serrage et les préhenseurs à plusieurs pointes indépendantes.

Les préhenseurs passifs ne possèdent pas d'actionneur. Il peut s'agir de pointes exploitant les forces d'adhésion [Lambert, 2007] ou permettant la préhension d'un composant par la réalisation d'une soudure temporaire dans un MEB [Aoki, 2003]. Il peut également s'agir de préhenseur exploitant un système de clips mécaniques [Bahadur et al., 2005, Tsai et al., 2005, Dechev et al., 2004a], ce principe a été initié par la société américaine Zyvex [Tsui et al., 2004]. La Figure 3.1 illustre un exemple typique. Ce type de préhenseur nécessite une conception mécanique et une microfabrication particulièrement soignées de l'ensemble des structures compliantes. Celles-ci sont par ailleurs dédiées à chaque application ce qui requiert de renouveler à chaque nouvelle application le processus de conception. Une fois le préhenseur et les objets correspondants réalisés, la maîtrise des tâches d'assemblage repose principalement sur le contrôle de trajectoires relatives entre préhenseur, objet et substrat d'assemblage.

Les préhenseurs intégrés actifs sont généralement constitués d'une structure compliant, dont la déformation est contrôlée par un actionneur. De très nombreux pré-

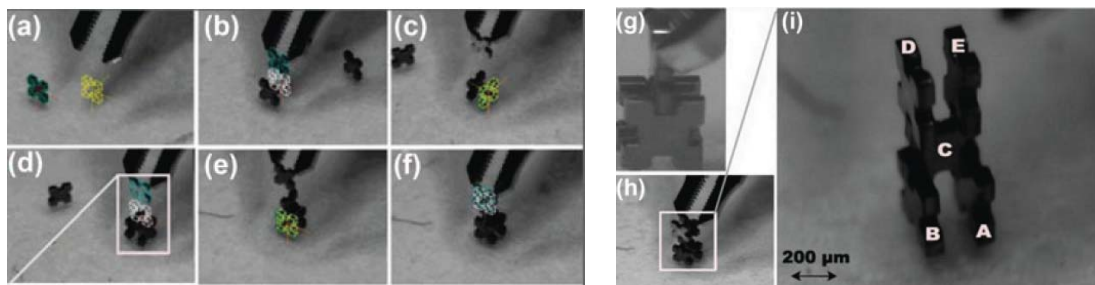


FIGURE 3.2 – Étapes de micro-assemblage automatisé par asservissement visuel et suivi du modèle CAO de l'objet [Tamadazte et al., 2011].

henseurs actifs ont été présentés dans la littérature proposant des structures compliantes variées et exploitant plusieurs principes d'actionnement. Les actionneurs électrostatiques [Piriyanont et al., 2013, Andersen et al., 2008, Beyeler et al., 2007], électrothermiques [Sun and Kim, 2014, Kim et al., 2008] et piézoélectriques [Xu, 2013b, Wang et al., 2013, Pérez et al., 2005] sont les plus répandus. Les préhenseurs actifs sont très versatiles puisqu'ils peuvent être utilisés pour manipuler de nombreux types d'objets de dimensions et de formes différentes. En revanche, leur comportement est le plus souvent non-linéaire et variant ce qui nécessite une modélisation multi-physique complexe ou une intégration de capteurs pour la réalisation de tâches précises.

Enfin, les préhenseurs à plusieurs pointes indépendantes comportent généralement deux ou trois pointes. Chacune d'entre elles est montée sur un porteur robotique sériel ou des robots mobiles permettant la génération de déplacements complexes et de larges amplitudes. Ce type de préhenseur est généralement très encombrant, mais permet une grande dextérité [Wason et al., 2012, Xie and Régnier, 2009, Driesen et al., 2005, Thompson and Fearing, 2001, Tanikawa and Arai, 1999].

3.1.2/ MICRO-ASSEMBLAGE AUTOMATISÉ

Automatiser l'assemblage de micro-objets revêt plusieurs intérêts : cela permet par exemple d'étudier les facteurs influents, de réduire les temps de cycle ou de démontrer la maîtrise des tâches et donc la compréhension des phénomènes en jeu. Différents travaux ont été présentés dans la littérature, j'ai choisi de présenter ci-après quatre exemples qui me semblent majeurs.

Assemblage automatisé par commande en boucle ouverte et préhenseur passif

L'équipe de Dan Popa (Université du Texas, USA) a étudié de manière approfondie l'assemblage par préhenseur passif. Le préhenseur utilisé est celui présenté en Figure 3.1. La plateforme d'assemblage est relativement complexe, puisqu'elle comporte 19 DDL répartis selon trois porteurs robotiques, permettant de déplacer le substrat d'assemblage, l'outil de préhension ou un outil annexe. Des assemblages automatisés ont été réalisés par commande en boucle ouverte. La précision de positionnement relatif entre l'outil de préhension et l'objet à manipuler étant critique pour la réussite des tâches d'assemblage, une procédure d'étalonnage a été mise en œuvre. Cet étalonnage exploite une mesure planaire par caméra et trois poses localisées dans trois des quatre angles de son champ de vue. La comparaison des poses mesurées à celles commandées permet d'identifier les matrices de transformation entre les repères robot et caméra, ainsi que quelques coefficients de correction. De nombreux essais d'assemblage ont été réalisés avec succès validant cette approche.

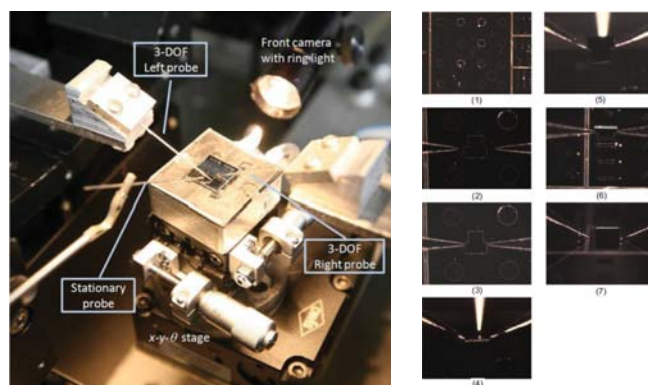


FIGURE 3.3 – Micro-assemblage automatisé par un préhenseur à trois pointes, retour visuel et estimation de la force de serrage [Wason et al., 2012].

Assemblage automatisé par préhenseur actif intégré et asservissement visuel

Toutes les plateformes de micro-assemblage possèdent une ou plusieurs caméras et ce, quel que soit le mode de commande utilisé. Les caméras délivrent en effet une très grande richesse d'informations. Celles-ci sont particulièrement utiles à l'opérateur en mode téléopéré, mais peuvent également être utilisées pour des commandes référencées capteur. Des spécificités de l'échelle micrométrique, comme la très faible profondeur de champ, la grande sensibilité à l'environnement ou des compromis sévères entre le besoin de champ de vue large et de très bonne résolution, constituent toutefois des limites difficiles à résoudre. De nombreuses approches ont été utilisées mettant en œuvre différents algorithmes de traitements d'images. Parmi elles, nous pouvons noter une approche exploitant le suivi du modèle CAO de l'objet manipulé dans la scène (voir Fig.3.2). Ces travaux ont permis la réalisation d'assemblages automatisés par asservissement visuel. Cependant, comme ils n'exploitent qu'une seule vue, l'étalonnage du porteur robotique doit être effectué avec soin.

Assemblage automatisé par préhenseur multi-pointes et commande référencée capteur

La Figure 3.3 présente un système de micro-assemblage exploitant un préhenseur à trois pointes : une étant fixe, les deux autres mobiles car montées sur des porteurs robotiques. Ce principe permet de saisir, déplacer, insérer des composants, mais également de réaliser des rotations du composant sur lui-même grâce à une coordination des trois pointes. Un retour visuel issu de deux caméras est utilisé pour estimer la position des composants manipulés. Une estimation de la force de serrage exercée sur le composant manipulé est également réalisée par estimation visuelle de la déformation des pointes de manipulation. Pour cela, plusieurs étapes d'étalonnage sont nécessaires (paramètres de la caméra, paramètres cinématiques, principe d'estimation de la force). Des cycles de micro-assemblage comportant des étapes de prise, de déplacement, de rotation et d'insertion sont réalisés automatiquement.

Micromanipulation automatisée par un préhenseur constitué de deux AFM et commande référencée capteur

La Figure 3.4 présente un système permettant la réalisation de pyramides de microsphères par micromanipulation automatisée. Pour cela, deux AFM sont utilisés simultanément et montés sur un système permettant leur déplacement relatif. Cet ensemble constitue alors une pince. Cette approche est originale car malgré les dimensions importantes du préhenseur, celui-ci possède de nombreuses caractéristiques intéressantes : nanositionnement avec capteurs de force intégrés, dimensions des outils adaptés, système commercial ne nécessitant pas de

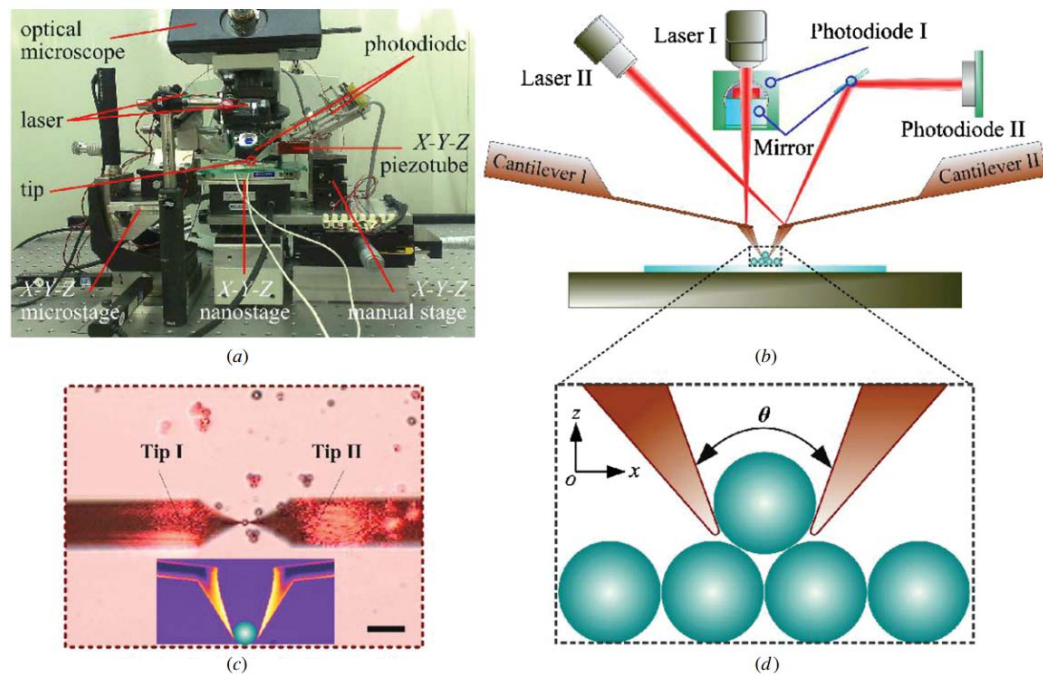


FIGURE 3.4 – Réalisation de pyramides de microbilles ($3\ \mu\text{m}$ de diamètre) par micromanipulation automatisée [Xie and Régnier, 2009] : (a) Système expérimental (b) Principe du préhenseur constitué de deux AFM (c) Vue de dessus montrant la préhension d'une bille par les extrémités des deux AFM dont l'ensemble forme une micropince instrumentée en force (d) Principe de préhension en vue latérale.

développement technologiques ou de microfabrication en salle blanche, interface permettant l'implémentation de stratégies de micromanipulation avancées. Ce préhenseur est associé à une mesure par vision utile à la localisation des microsphères à manipuler et de planifier les trajectoires du préhenseur. Ces travaux ont conduit à la réalisation de 5 pyramides de 4 sphères chacune en mode automatisé.

3.1.3/ APPROCHE RETENUE

Les différents travaux, que nous venons de présenter, montrent plusieurs caractéristiques importantes :

- les préhenseurs actifs offrent une grande versatilité ;
- la capacité de générer différents mouvements relatifs entre les deux doigts de préhension d'une micropince permet une dextérité utile à la réalisation de tâches complexes ;
- la vision est un moyen de mesure offrant une richesse d'informations très utiles ;
- la mesure de forces de contacts préhenseur-objet permet de définir des stratégies de prise, de maintien et de dépose adaptées aux spécificités de l'échelle micrométrique ;
- les forces de surface et plus largement le comportement erratique des composants influencent de manière notable la précision des assemblages réalisés, les taux de réussite ou l'automatisation des tâches d'assemblage ;
- l'étalonnage ou la modélisation sont très utiles, mais particulièrement délicats ;
- utiliser, comme cas d'étude, une application nécessitant la réalisation de tâches de micro-assemblage complexes est source d'une grande richesse d'enseignements.

Pour ces principales raisons, nous avons choisi d'étudier différentes problématiques. Tout d'abord, nous avons établi une collaboration avec le département MN2S de l'institut FEMTO-ST afin de proposer le concept de micro-banc optique assemblé. Choisi comme cas d'étude applicatif, ce concept est présenté en section 3.2. Parallèlement, nous avons conduit plusieurs travaux visant à étudier en profondeur les problématiques du micro-assemblage complexe et précis (présentés en section 3.3). Pour cela, nous avons d'abord souhaité étudier les forces de surface pouvant apparaître pendant un processus de micro-assemblage (section 3.3.1). Nous avons alors proposé une plateforme de micro-assemblage fondée sur des porteurs robotiques et un principe de préhension actif exploitant l'effet piézoélectrique. Plusieurs approches de micro-assemblage ont ensuite été étudiées : téléopéré, automatisé par asservissement visuel et automatisé par commande hybride force-position. Ces différents travaux ont conduit à plusieurs contributions originales respectivement présentées en sections 3.3.2, 3.3.3 et 3.3.4. Par ailleurs, ils conduisent à la définition des trois thématiques scientifiques, qui ont été étudiées pendant la seconde phase de mes travaux (2010 à 2015).

3.2/ CAS D'ÉTUDE MOEMS : MICRO-BANC-OPTIQUE

La majorité des travaux de la littérature portent sur la manipulation de micro-objets génériques tels que des micro-sphères ou des composants prismatiques. A l'inverse, quelques équipes ont développé des concepts de microsystèmes complexes à assembler. Cette alternative est intéressante pour plusieurs raisons. Elle permet par exemple, de proposer des microsystèmes réellement fonctionnels et innovants, et elle offre un cadre applicatif permettant l'étude de tâches complexes de micro-assemblage. Elle démontre le potentiel du micro-assemblage et nécessite de considérer simultanément plusieurs problématiques complexes. Et, finalement, elle permet de démontrer la maîtrise des différents outils et approches proposées.

Par ailleurs, nous avons analysé les différents domaines applicatifs potentiellement intéressés par la micromanipulation et le micro-assemblage et nous avons recensé plusieurs familles d'applications [Tolfree and Jackson, 2006]. Nous avons notamment souhaité nous orienter vers le domaine des MOEMS, notamment en proposant un concept de micro-banc-optique, détaillé dans la section suivante, pour les différentes raisons suivantes :

- ce domaine applicatif est très dynamique et produit de nombreuses applications innovantes tant pour de grandes séries de produits que des marchés de niche ;
- les MOEMS sont au cœur des problématiques de microfabrication en salle blanche, ce sont par essence des produits fortement hétérogènes, multifonctionnels et souvent tridimensionnels pour lesquels de nombreux compromis de microfabrication doivent être effectués limitant considérablement les performances des produits finaux. Leur assemblage ouvre de nombreuses possibilités ;
- la finalité optique des MOEMS requiert bien souvent des niveaux de précision de positionnement relatif ou d'assemblage de composants élevés, typiquement bien inférieurs au micromètre pour garantir les performances du produit final.

Les composants élémentaires à intégrer dans un MOEMS sont très divers tout comme les fonctionnalités optiques réalisables via la combinaison de plusieurs de ces composants, le domaine des MOEMS est donc source d'une grande richesse et diversité de composants et d'applications.

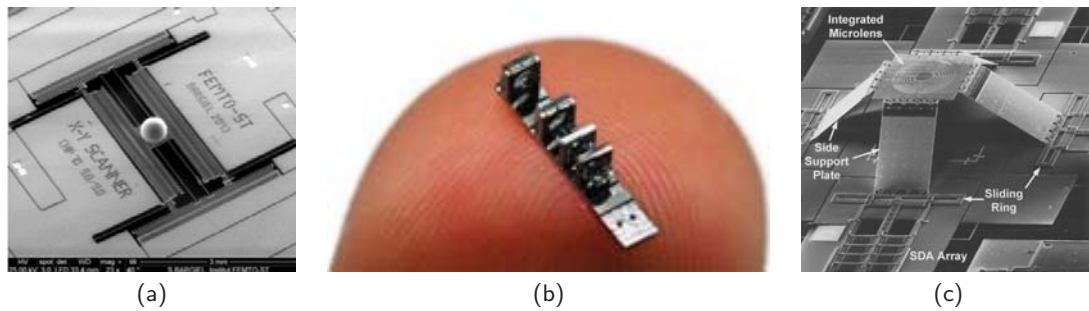


FIGURE 3.5 – Exemples de MOEMS assemblés ou dépliés manuellement (a) Microscanner XY [Baranski, 2015] (b) tête d'endoscope OCT (Tomographie par Cohérence Optique) [Weber et al., 2012a] (c) Micro-lentille de Fresnel sur structure XYZ [Wu et al., 2000].

3.2.1/ CONCEPT DU MICRO-BANC-OPTIQUE

La littérature regorge de nouveaux MOEMS : plusieurs études font explicitement état d'assemblage, par l'assemblage d'une bille servant de lentille sur un scanner MEMS (Figure 3.5(a)), ou par la réalisation de structures 3D hors plan (par assemblage manuel (Figure 3.5(b)) ou par le dépliage une structure souple (Figure 3.5(c))). Ces travaux sont réalisés manuellement malgré les risques, que cela comporte, tant en termes de fragilité des structures qu'en termes de qualité et de précision des tâches réalisées. Ils illustrent donc bien le réel besoin de réaliser des structures MOEMS hétérogènes et tridimensionnelles. D'autres travaux, initiés par l'équipe de Descour au début des années 2000, ont permis de réaliser une première "micro-table optique" résultant de l'assemblage de plusieurs composants élémentaires perpendiculairement à un substrat [Descour et al., 2002]. Les liaisons composants élémentaires-substrat sont dédiées et le collage des composants sur le substrat est nécessaire avant leur dépôt par le préhenseur. Ces deux points ont été choisis pour faciliter l'assemblage, mais s'avèrent être aussi des limites fortes : les liaisons dédiées induisent un seul type de produit et le collage du composant, avant de le déposer, ne permet pas une maîtrise suffisante de la précision d'assemblage avoisinant pourtant déjà $4\ \mu m$. Plusieurs autres travaux ont suivi [Wu et al., 2000, Manzardo, 2002, Wolffenbuttel, 2005, Das et al., 2008b], exploitant toujours un principe d'assemblage non réversible et très souvent des liaisons mécaniques composant-substrat dédiées.

Compte-tenu du savoir-faire du département AS2M relatif aux matériaux actifs, de leur potentiel pour la réalisation d'opérations complexes et précises de micro-assemblage, nous avons proposé un concept de Micro-Banc-Optique. L'originalité du concept repose sur l'utilisation du micro-assemblage par matériaux actifs qui permet de réaliser des Micro-Bancs-Optiques modulaires et reconfigurables grâce à des liaisons composant-substrat génériques et repositionnables. Ces travaux reposent sur la collaboration, que nous avons pu établir, entre les départements AS2M et MN2S (équipe de Christophe Gorecki experte dans le domaine de l'optique intégrée) de l'institut FEMTO-ST.

Ce concept repose sur une librairie de composants optiques élémentaires, que l'on peut assembler le long d'un ou plusieurs axes optiques d'un substrat de référence (voir Figure 3.6(a)). Cette diversité de composants et de combinaisons de positions possibles permet de réaliser de très nombreux types de fonctions optiques élémentaires ou plus complexes comme un interféromètre de Michelson.

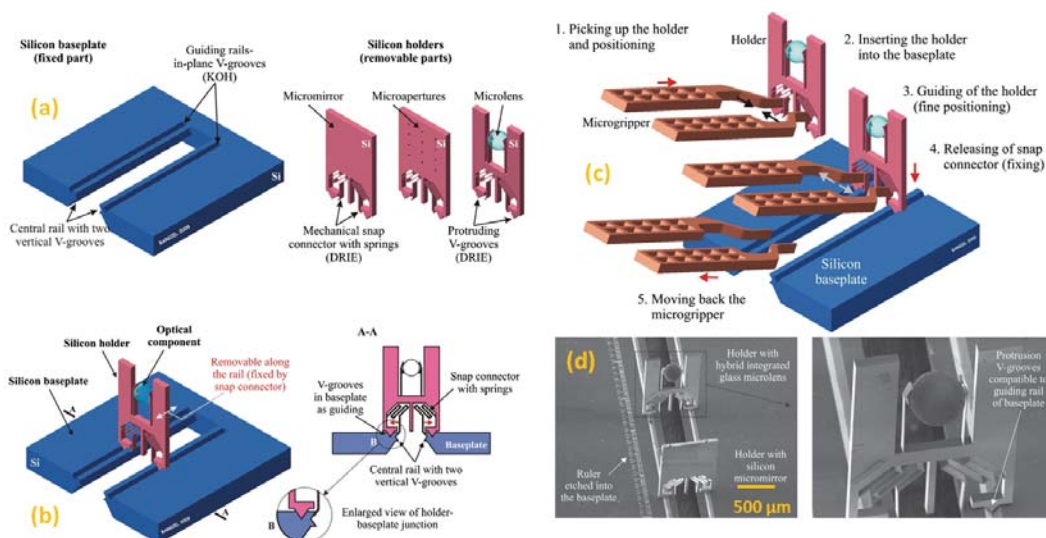


FIGURE 3.6 – Concept de Micro-Banc-Optique : (a) Composants élémentaires (substrat possédant un axe optique et trois types de composants optiques élémentaires) (b) détails sur les systèmes de vés (positionnement précis d'un composant sur le substrat) et de ressorts (maintien du composant sur le substrat) (c) étapes principales du processus d'assemblage d'un composant sur son substrat (d) exemple de Micro-Banc-Optique assemblé.

3.2.2/ FONCTIONS ÉLÉMENTAIRES ET LEUR RÉALISATION

Chaque composant optique possède deux zones distinctes. Une première comporte un système de vés utiles au positionnement précis du composant le long d'un axe optique du substrat et de ressorts permettant le maintien du composant sur ce substrat une fois l'alignement réalisé (voir Figure 3.6(b)). Cette zone est la même pour tous les composants optiques élémentaires gage de généricité et de reconfigurabilité. Une seconde zone, spécifique à chaque composant, comporte un composant optique élémentaire (miroir, séparateur, lentille...).

Ces choix de conception sont originaux dans le sens où ils reposent sur une mise en position hyperstatique, choix qui ont été assumés pour des raisons de compromis qualité de réalisation des surfaces grâce aux techniques de microfabrication en salle blanche - besoin de stabilité et de précision. En effet, le substrat est réalisé dans un wafer Silicium de type n avec une orientation cristalline (100) ce qui a permis de réaliser des vés "parfaits" car définis par les plans cristallins du Silicium. La fabrication du substrat a également induit des procédés de microfabrication originaux (alternance de gravures sèches et humides, le procédé est détaillé dans l'article JMM de Sylwek) compte-tenu du double système de vés permettant :

- la mise en position des composants le long du rail (intitulés "V-Groove in baseplate as guiding" dans la figure 3.6(b)) ;
- le maintien de ces composants via les ressorts (intitulés "central rail with two vertical V-grooves" dans la figure 3.6(b))

La fabrication des composants optiques, quant à elle, repose sur un procédé de microfabrication relativement simple (wafer SOI, usinage face avant gravure sèche DRIE) et face arrière par gravure humide. Notons que ces composants optiques restent maintenus au wafer à l'issue de leur fabrication par des liaisons dites sécables. Il s'agit de liaisons fragiles, qui sont cassées lors de la prise des composants par la micropince et utiles au référencement des composants.

3.2.3/ ASSEMBLAGE D'UN DÉMONSTRATEUR

L'assemblage des composants optiques sur le substrat est réalisé par une micropince montée sur un porteur robotique (la plateforme d'assemblage utilisée est présentée en section 3.3.2) et suit le processus d'assemblage suivant :

- un composant est saisi par la micropince par déformation de ses ressorts ;
- le composant saisi est guidé le long de l'axe optique défini par des rails de guidage (système de vés femelles du substrat) et ce, jusqu'à ce que la position désirée soit atteinte ;
- le composant est déposé par ouverture progressive des doigts de pince qui permettent aux ressorts de venir s'accrocher dans le système de vés latéraux du substrat (intitulés vés verticaux dans la Figure).

La figure 3.6(c) détaille les principales étapes de ce processus d'assemblage et la figure 3.6(d) présente un démonstrateur assemblé et constitué de deux composants optiques différents (une lentille de collimation et un miroir) alignés le long d'un axe optique.

3.3/ MISE EN ÉVIDENCE DES PROBLÉMATIQUES DU MICRO-ASSEMBLAGE COMPLEXE ET PRÉCIS

L'étude du micro-assemblage complexe et précis est une thématique encore très ouverte en raison des nombreuses spécificités liées à l'échelle micrométrique (présentées en section 2.1.3), mais également en raison de nombreuses limitations technologiques. Les approches présentes dans la littérature sont très différentes et nous ont conduit à réaliser plusieurs travaux permettant d'approfondir les problématiques scientifiques majeures qu'elles comportent. Des essais préliminaires nous ont montré que le comportement des micro-objets peut être particulièrement imprévisible. Le manque de connaissances des phénomènes physiques en jeu ainsi que de modèles fiables permettant de prévoir le comportement des objets, nous ont amené à conduire une première étude présentée en section 3.3.1. Nous avons également développé différentes plateformes de micro-assemblage pour étudier l'assemblage des micro-bancs optiques en mode téléopéré (présenté en section 3.3.2), puis de manière automatisée par deux approches complémentaires : par asservissement visuel (présentée en section 3.3.3) puis par commande hybride force-position (présentée en section 3.3.4). Ces travaux nous ont permis d'établir une synthèse et une analyse des problématiques scientifiques du micro-assemblage complexe et précis conduisant à orienter la suite de mes travaux (trois thématiques scientifiques de la seconde phase de mes travaux entre 2006 et 2015).

3.3.1/ CARACTÉRISATION DE LA FORCE DE PULL-OFF

La réalisation de quelques essais de manipulation de micro-objet est suffisante pour se rendre compte de son comportement erratique et des difficultés induites dans une perspective de micro-assemblage : difficulté de saisir un composant en raison de forces agissant à distance et engendrant des déplacements des objets avant leur saisie, difficulté de contrôler la position du composant entre les doigts d'une micropince lors de sa saisie, difficulté de déposer ce composant sans le perdre, difficulté de le déposer à l'endroit voulu...

Ce type de problématique s'avère actuellement encore particulièrement ouverte en raison de la combinaison des phénomènes, de l'influence de très nombreux paramètres et des difficul-

tés de conduire des expériences validant des hypothèses théoriques. Ce type de difficultés amène les physiciens à se concentrer sur l'étude de contacts de type ponctuel ou linéique [Leckband, 2008a, Leckband, 2008b, Drumond and Richetti, 2007]. Or, le micro-assemblage induit des contacts de type planaire et de dimensions bien supérieures à celles étudiées par les physiciens. Il en va de même pour l'amplitude des forces en jeu, d'environ trois ordres de grandeur supérieur en micro-assemblage. Compte-tenu de ces spécificités, des microroboticiens se sont saisi du problème et ont proposé des modèles en s'intéressant également à leurs validations expérimentales. Celles-ci se sont d'ailleurs avérées limitées par le manque de moyens de mesure de micro-forces, la majorité des travaux reposant sur l'utilisation d'AFM [Jang et al., 2007, Butt et al., 2005]. Les différentes études conduites ont toutefois permis d'identifier, que les forces en jeu à l'échelle micrométrique sont principalement des forces électrostatiques, des forces de van der Waals et des forces de capillarité [Gauthier and Régner, 2010, Lambert, 2007]. Différentes solutions ont d'ailleurs été proposées pour faciliter la manipulation de composants (mise à la masse des outils de préhension et du substrat d'assemblage, génération d'accélération élevées pour permettre la dépose précise d'un composant...). Malgré cela, les difficultés rencontrées par les physiciens à l'échelle nanométrique sont également vraies à l'échelle micrométrique. Les études conduites ne permettent pas de prévoir de manière suffisamment fiable le comportement d'un micro-objet pendant sa manipulation.

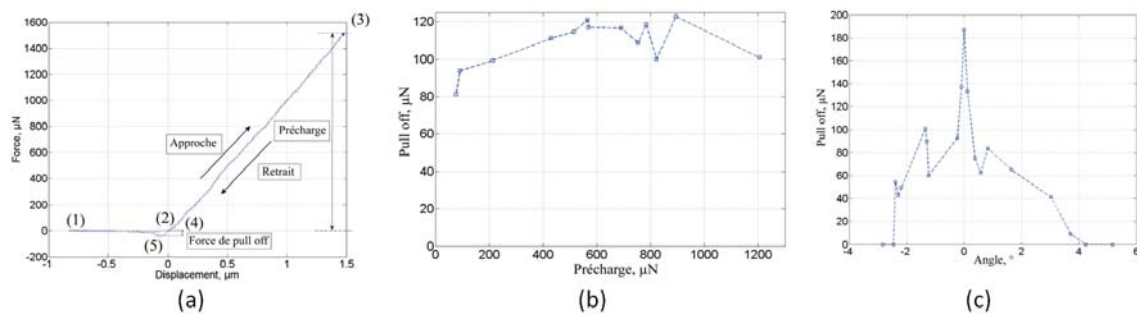


FIGURE 3.7 – Mesure de force de pull-off (a) courbe d'approche-précharge-retrait permettant de quantifier cette force (b) influence de la précharge sur la force de pull-off (c) influence de l'angle (deux surfaces non parallèles) sur la force de pull-off.

Ce manque de connaissances associé à la prédominance de ces phénomènes nous a conduit à réaliser une première étude. Nous avons souhaité que celle-ci se repose sur une approche purement expérimentale et dédiée aux contacts surfaciques typiques que l'on peut rencontrer lors d'un processus de micro-assemblage. Pour conduire cette étude, nous avons souhaité saisir l'opportunité apparue lors de la création de la société Suisse Femtotools en 2007. En effet, cette société est une spin-off de l'ETHZ issue de l'activité de recherche du Professeur Nelson et commercialise les premiers capteurs calibrés utiles à la mesure de microforces (plage de mesure de 2 mN, résolution inférieure au μN).

Pour cela, nous avons mis en œuvre une plateforme expérimentale intégrant un de ces capteurs et une structure robotique porteuse et réalisé des essais expérimentaux de type approche-précharge-retrait. La plateforme et l'interface logicielle associée ont été conçues pour étudier l'influence de paramètres comme l'angle de contact, la zone de contact, l'intensité de la précharge ainsi que la vitesse d'approche, tout en considérant la température et le degré d'hygrométrie. Les contacts étudiés entre les deux surfaces sont de nature planaire : d'un côté, l'extrémité du capteur de micro-forces ($50 \times 50 \mu m \times \mu m$), de l'autre, un échantillon, tous deux en Silicium.

Différents essais préliminaires ont permis de constater la prédominance de la force de pull-off qui est celle à exercer pour séparer les deux surfaces (combinaison de forces capillaires, de van der Waals...). Cette force joue un rôle particulièrement important pendant un cycle de micro-assemblage puisqu'elle induit un collage du composant sur les outils de préhension, ce qui rend particulièrement complexe la dépose du composant (les composants ont tendance à rester coller sur les doigts de pince lorsqu'elle s'ouvre).

La figure 3.7(a) représente une courbe d'approche-retrait typique réalisée pour laquelle une précharge de $1535 \mu N$ a été appliquée et une force de pull-off de $25 \mu N$ a été mesurée. L'étude menée montre que la force de pull-off peut varier entre 0 et $196 \mu N$ et que l'angle entre les deux surfaces (lorsqu'elles ne sont pas parallèles) est le paramètre le plus influent. L'intensité de cette force est conséquente puisqu'elle est typiquement une centaine de fois supérieure au poids des objets manipulés à l'échelle micrométrique. Ses effets lors d'un processus d'assemblage sont donc importants compte-tenu du nombre de transitions contact/non-contact rencontrées pendant un processus de micro-assemblage (par exemple lors de la dépose d'un composant ou lors du guidage d'un composant dans un rail). Les difficultés induites par cette force sont nombreuses que ce soit en termes de précision, de rapidité de réalisation d'une tâche robotisée ou pour la mise en œuvre d'une stratégie d'assemblage.

Cette étude conduite pendant la thèse de Kanty Rabenorofoa, nous a permis de comprendre le rôle majeur de la force de pull-off pour la réalisation de tâches de micro-assemblages. Cette étude a fait l'objet d'une publication en revue (J6) qui était d'ailleurs l'article le plus cité de la revue pour l'année 2014 (indice i5). La quantification de cette force et la compréhension des paramètres influents a été exploitée, par la suite, pour proposer des stratégies d'assemblages originales (voir sections 3.3.4 et 6.3).

3.3.2/ MICRO-ASSEMBLAGE TÉLÉOPÉRÉ

Plusieurs plateformes de micro-assemblage ont été développées dans le cadre des travaux que j'ai conduit. Celles-ci ont eu pour but de réaliser des campagnes de validations expérimentales de stratégies ou de lois de commande, de principes de préhension, de principes d'actionnement ou de mesure, de performances de structures robotiques, mais également de la précision d'assemblage. De part leurs objectifs très différents, les plateformes réalisées possèdent de nombreuses spécificités notamment en terme de structure cinématique. Dans ce document, nous avons fait le choix de n'en présenter qu'une afin d'illustrer certaines problématiques. La plateforme présentée a été développée pour réaliser l'assemblage de composants optiques sur un substrat pour former un micro-banc-optique (présenté en section 3.2.1). Cette plateforme a conduit à l'étude de trois objectifs intermédiaires, qui seront détaillés par la suite :

- l'assemblage d'un composant optique sur le banc optique en mode téléopéré ;
- l'assemblage d'un composant optique sur le banc optique en mode automatique par asser-vissement visuel ;
- la quantification de la précision de positionnement de ce composant à l'issue de son assemblage.

Ces objectifs nécessitent de définir l'architecture de la plateforme de micro-assemblage, tant d'un point de vue matériel que logiciel. La plateforme intègre une micropince actionnée par matériaux actifs, montée sur un porteur robotique. La micropince choisie est celle préalablement développée au département. Son actionneur piézoélectrique possède une structure particulière, puisque chaque doigt est un duo-bimorphe, voir la Figure 3.8 qui explicite la vue en coupe

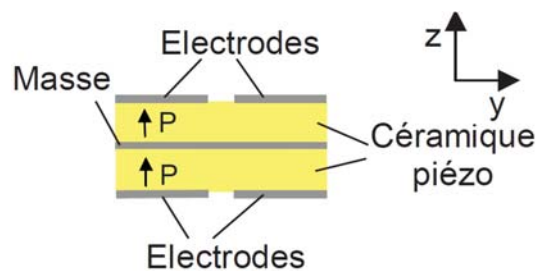


FIGURE 3.8 – Vue en coupe d'une poutre duo-bimorphe.

d'un doigt. Ce type de structure possède 5 électrodes ce qui permet d'alimenter la poutre de différentes manières. Des déplacements de grande amplitude et très résolus peuvent alors être réalisés que ce soit dans le plan ($\pm 80 \mu m$) et hors du plan ($\pm 200 \mu m$) et ce pour chacun des deux doigts de la micropince. Cette micropince est ainsi dotée de 4 Degrés De Libertés (DDL) permettant la manipulation réversible, dextre et précise de composants (voir Fig. 3.9(c)).

Le rôle du porteur robotique est de permettre le déplacement relatif entre deux composants à assembler (composant optique par rapport au substrat pour notre cas d'étude). Les déplacements à réaliser peuvent atteindre plusieurs millimètres et doivent être particulièrement résolus pour permettre de réaliser un assemblage de bonne qualité (une précision de positionnement d'un composant optique après son assemblage d'un μm est visé) et selon les 6 directions de l'espace (3 translations et 3 rotations). Compte tenu du choix limité de technologies disponibles commercialement, une combinaison de plusieurs porteurs robotiques associant des axes de micropositionnement (course de quelques millimètres, précision de quelques dizaines de μm) et des axes de nanopositionnement (course de quelques dizaines de μm et de précision sub-micrométrique) est retenue. A cette nécessité viennent s'ajouter plusieurs autres contraintes fortes : chaque axe de déplacement ne peut supporter qu'un poids très limité, une structure robotique complexe induit des défauts supplémentaires conséquents et réduit l'accessibilité au détriment de la qualité du retour visuel. En effet, la plateforme d'assemblage intègre 4 caméras nécessaires à la visualisation des composants pendant les différentes étapes du processus d'assemblage : une caméra pour la prise du composant optique, et 3 pour son assemblage sur le substrat.

La plateforme d'assemblage développée (voir Fig. 3.9), résultant du compromis des différents critères explicités précédemment, comporte les 4 porteurs robotiques suivants :

- le premier porteur (intitulé "microrobot 1") permet de générer des déplacements importants du composant maintenu par un préhenseur à vide grâce à 4 axes de micropositionnement $XM_1, YM_1, ZM_1, \theta YM_1$;
- le microrobot 2 permet de déplacer la micropince selon 4 DDL : $XM_2, YM_2, ZM_2, \theta XM_2$;
- le microrobot 3 réalise des mouvements fins (axes de nanopositionnement) selon 5 DDL : $XM_3, X'M_3, YM_3, ZM_3, \theta ZM_3$;
- le microrobot 4 permet de positionner le capteur laser par rapport au substrat d'assemblage selon 3 DDL : XM_4, YM_4, ZM_4 .

Enfin, tous les axes robotiques, capteurs, outils de préhension sont reliés à un ordinateur à travers différents ports (USB, RS232 ou carte PCI). Une interface logicielle développée sous Matlab permet à l'opérateur de contrôler la plateforme d'assemblage de différentes manières (joystick, clavier, souris, programmation) et selon différents modes : téléopéré, semi-automatisé ou automatisé.

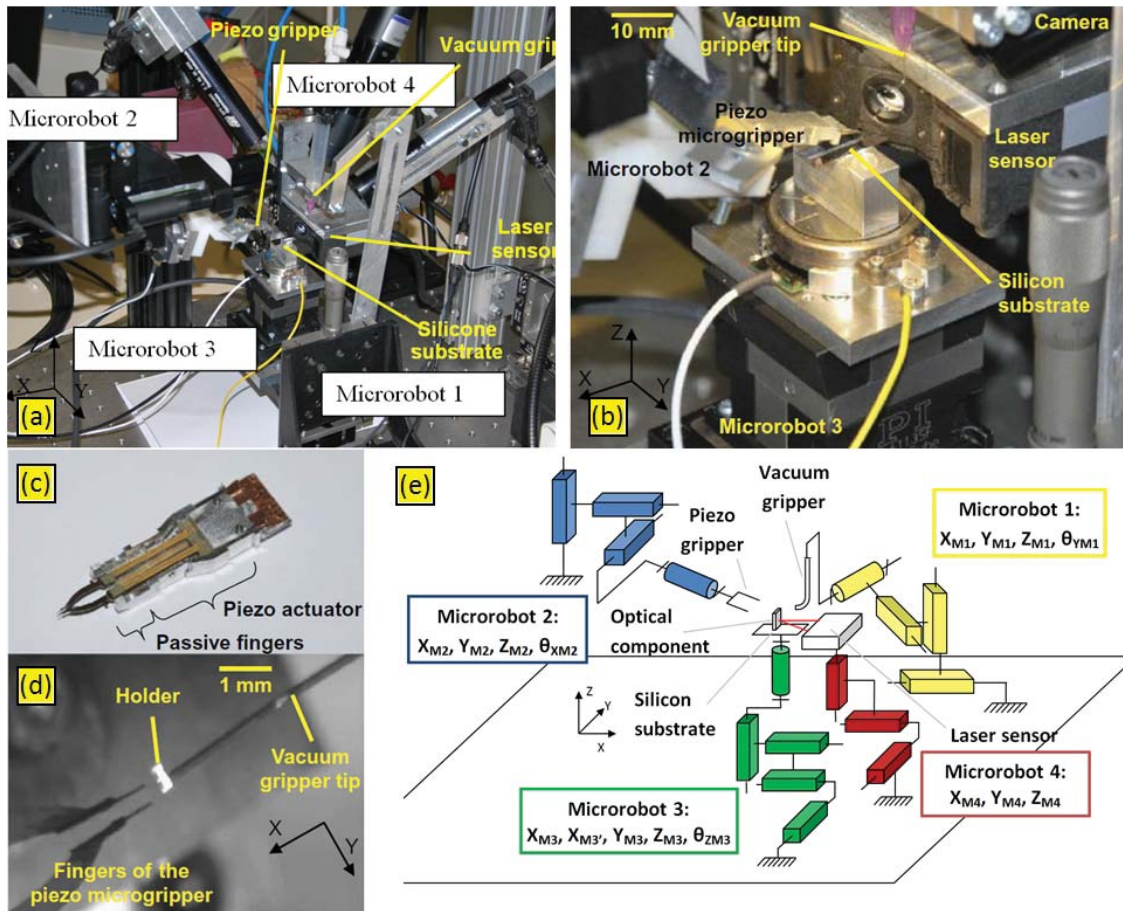


FIGURE 3.9 – Plateforme de micro-assemblage intégrant une micropince piézoélectrique, un préhenseur à vide, un capteur laser et 16 axes de micro ou nano positionnement répartis selon 4 structures porteuses (a) vue générale (b) vue rapprochée montrant le substrat et le capteur laser (c) micropince piézoélectrique à 4 DDL (d) vue d'un composant optique maintenu par le préhenseur à dépression en attendant d'être saisi par la micropince (e) schéma cinématique de la plateforme de micro-assemblage.

L'assemblage du micro-banc-optique, choisi comme cas d'étude (présenté en section 3.6), est réalisé en suivant le processus d'assemblage suivant : (1) le préhenseur à dépression saisit, puis sort un composant optique du wafer. Le composant est présenté en face de la micropince (voir Fig 3.9(d)). La micropince saisit ce composant optique en déformant ses 2 ressorts, (2) le composant est déplacé à proximité du substrat grâce au microrobot 2 (3) le composant est inséré dans le rail de guidage, puis guidé le long de l'axe optique en combinant les mouvements grossiers du microrobot 2 et les mouvements fins du microrobot 3, (4) une fois la position désirée du composant optique atteinte, la micropince le relâche progressivement engendrant son auto-alignement sur les rails de guidage, (5) la micropince est retirée et un autre cycle d'assemblage peut débuter.

Ces travaux nous ont permis de réaliser avec succès de multiples tâches complexes de micro-assemblage validant ainsi l'approche mise en œuvre. Nous avons également pu identifier avec plus de précision certaines limites. Par exemple, un cycle d'assemblage (de la prise d'un composant optique de son wafer à son assemblage final sur le banc) reste globalement long, typiquement 30 minutes pour un opérateur entraîné et dépend très fortement de son expertise.

Cette dépendance forte est liée au comportement parfois erratique des composants manipulés, du manque d'informations locales, des limites des moyens de visualisation (besoin de combiner des vues larges et vue locales, problème de profondeur de champ, correspondance entre plusieurs vues partielles), mais également de part le manque de repères (estimation de la position actuelle du composant manipulé, définition de la position finale désirée, définition du lien entre le repère de l'objet manipulé, de celui du préhenseur et celui du substrat). Les études présentées ci-après visent à étudier ces verrous.

Ces travaux de micro-assemblage téléopéré ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Kanty Rabenorosoa et ont conduit à la publication d'un article de revue (J7) et de deux articles de conférences (C22, C15), C15 ayant permis l'obtention d'un "Special award" (1 papier récompensé sur 62).

3.3.3/ MICRO-ASSEMBLAGE AUTOMATISÉ PAR ASSERVISSEMENT VISUEL

Plusieurs équipes de recherche étudient l'automatisation de tâches de micromanipulation ou de micro-assemblage. Différentes approches sont possibles mais une majorité des commandes référencées capteurs exploitent une mesure par vision [Wang et al., 2010a, Anis et al., 2010, Abbott et al., 2007, Yesin and Nelson, 2005]. Ce constat s'explique très probablement par la présence systématique de caméras dans les plateformes de micro-assemblage. Celles-ci peuvent apporter un grand nombre d'informations dans un contexte (ou environnement) dimensionnel où il est particulièrement difficile de réaliser des mesures. Malgré cet engouement, ce moyen de mesure possède des limites fortes en raison de spécificités liées à l'échelle dimensionnelle. Nous pouvons, par exemple, noter de très faibles profondeurs de champ, des compromis champ de vue/résolution très complexes à fixer, l'hypothèse de projection parallèle prédominante (contrairement à l'échelle macroscopique) ne permettant pas d'obtenir d'information de profondeur...[Hartley and Zisserman, 2003].

Compte-tenu des différentes problématiques explicitées dans la littérature, nous avons souhaité utiliser un principe de suivi du modèle CAO du composant manipulé [Feddema and Simon, 1998]. Brahim Tamadazte a expérimenté avec succès ce principe pendant sa thèse en utilisant une vision monoculaire [Tamadazte, 2009]. En revanche, les composants optiques, que nous souhaitons assembler, possèdent un facteur de forme très élevé (supérieur à 20) et nécessitent un processus d'assemblage complexe, ne permettant pas d'utiliser cette technique avec succès. Pour cette raison, nous avons proposé l'extension de cette approche à une vision stéréoscopique, c'est-à-dire exploitant deux vues (obtenues via deux caméras). Cette technique permet d'obtenir la position du composant manipulé dans l'espace (l'échelle micrométrique considérée induit une très faible profondeur de champ rendant une mesure par une seule caméra incomplète). Suite à cela, il est alors possible de commander le robot afin de positionner le composant manipulé sur une cible (position souhaitée à atteindre).

Le suivi du composant dans l'image est possible grâce à l'interfaçage des caméras avec l'ordinateur de commande et l'utilisation d'une bibliothèque appelée CvLink permettant l'utilisation d'OpenCv sous Simulink. Cette bibliothèque permet de réaliser successivement différentes étapes comme afficher une image, la rogner, appliquer des filtres permettant d'extraire le contour du composant. Suite à cela, la bibliothèque ViSP (Visual Servoing Platform [Marchand et al., 2005]) est utilisée afin d'extraire les coordonnées 3D et les angles du composant manipulé (la pose actuelle du composant apparaît en rouge sur la Figure 3.10(a)).

Chacune des deux caméras permet l'obtention d'une image et donc la position du composant dans son propre référentiel. Cette étape consiste en premier lieu à déterminer la transforma-

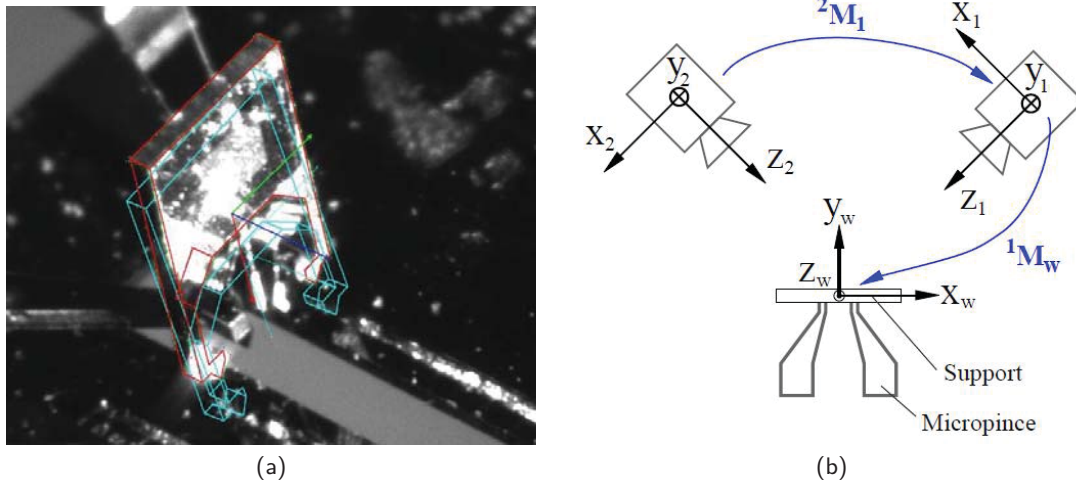


FIGURE 3.10 – Mesure de la position d'un objet dans l'espace par suivi de son modèle CAO (a) Image incluant la pose actuelle de l'objet (en rouge) et la pose à atteindre (en bleu) (b) Représentation des matrices de changement de repères pour un suivi par stéréovision.

tion entre les deux caméras, c'est-à-dire établir la relation mathématique entre la position du composant vu par une caméra et la position de ce même composant vu par l'autre caméra (matrice de passage 2M_1 sur la Figure 3.10(b)). Dans un second temps, la matrice 1M_W permet d'établir la transformation de la position du composant exprimée dans le repère image à la position du composant exprimée dans celui du robot (intitulé W). Les coefficients des deux matrices de transformation sont identifiés par une étape d'étalonnage. Pour cela, le composant est saisi par la micropinçe en mode téléopéré. Il est ensuite déplacé dans le champ visuel des deux caméras. Pendant ce temps, trois informations complémentaires sont enregistrées : le flux vidéo issu de chaque caméra ainsi que les données de mesure en position (capteurs de position de chaque axe du robot de micropositionnement qui génère le déplacement du composant). Un algorithme d'optimisation est ensuite utilisé pour minimiser la distance entre la position obtenue par le tracker et celles obtenues par les capteurs du microrobot.

Une fois la position du composant déterminée, il est possible de l'exploiter afin de commander le robot et ainsi de positionner le composant à l'endroit désiré le long du rail (substrat du banc optique). Le schéma de la commande mis en œuvre est présentée Figure 3.11. Son objectif est de minimiser l'erreur entre la position et orientation actuelle du composant manipulé ($s(t)$) et la position désirée (s^*), ce qui permet typiquement d'obtenir des images comme présentées en Figure 3.10.

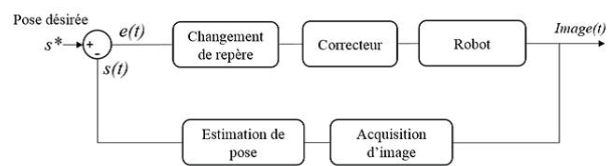


FIGURE 3.11 – Schéma bloc de l'asservissement visuel.

Des essais expérimentaux ont montré que cette technique permet de positionner le composant à la position désirée avec une erreur de positionnement de l'ordre d' $1 \mu m$ selon les trois directions de l'espace en quelques secondes (compromis vitesse-précision).

Cette approche par asservissement visuel, fondée sur le suivi stéréoscopique du modèle CAO du composant manipulé, a conduit à la réalisation avec succès de l'assemblage automatisé de composants complexes. Elle s'avère toutefois relativement dédiée au type de composant à

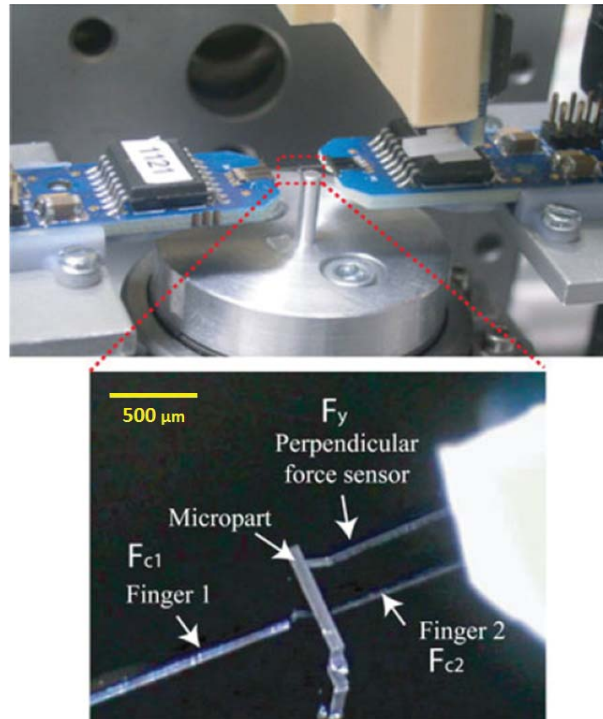


FIGURE 3.12 – Plateforme expérimentale intégrant un préhenseur à deux doigts de serrage, chacun intégrant un capteur de microforces.

assembler. Ces travaux permettent une mesure avec une précision intéressante pour un problème dans l'espace. Une association avec des capteurs de forces de contact et une commande hybride force-vision constitue une perspective prometteuse.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du stage d'Andrey Kudryavtsev et ont conduit à la publication d'un article de revue (J20) et de deux articles de conférences (C43 et C41) qui détaillent la méthode mise en œuvre et les résultats obtenus.

3.3.4/ MICRO-ASSEMBLAGE AUTOMATISÉ PAR COMMANDE HYBRIDE FORCE-POSITION

Nous avons également souhaité étudier l'automatisation d'assemblage par commande référencée force en raison de plusieurs verrous qui ne peuvent que très partiellement être abordés par les approches exploitant une mesure visuelle : la prédominance des forces surfaciques à l'échelle micrométrique, les dynamiques très importantes ainsi que la fragilité des composants. Ces verrous sont amplifiés par le manque de capteurs permettant la mesure de force [Clévy et al., 2011, Lu et al., 2006]. Différentes solutions ont été développées comme l'utilisation d'AFM [Lu et al., 2006], de la vision mesurant la déformation d'une structure compliant [Reddy et al., 2010] ou de micropinces instrumentées (généralement un doigt est actionné, le second est passif permettant une mesure de la force) [Beyeler et al., 2007].

Des travaux en commande ont également été réalisés pour contrôler la force d'impact [Volpe and Khosla, 1993, Zhou et al., 1998] ou la force de serrage [Carrozza et al., 2000, Rakotondrabe and Ivan, 2011].

Compte-tenu de ces travaux et des verrous explicités ci-dessus, nous avons souhaité proposer

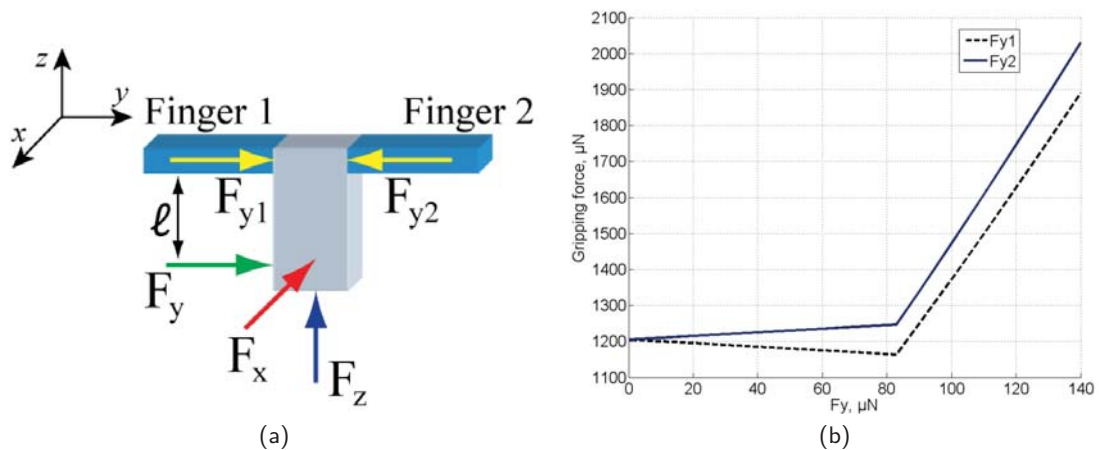


FIGURE 3.13 – (a) Forces agissant sur un composant pendant sa manipulation (b) Modèle présentant l'évolution des forces de serrage F_{y1} et F_{y2} lorsque le composant manipulé subit une force latérale selon Y (F_y). Cette caractéristique nous a permis d'établir une force latérale limite ($85 \mu N$) en deçà de laquelle la prise du composant est considérée stable (contacts plan/plan).

un préhenseur à deux doigts instrumentés et capable de mesurer les forces en jeu lors d'un processus de micro-assemblage (de l'ordre du mN). Pour sa réalisation, nous avons saisi une opportunité liée à la création de l'entreprise Suisse Femtotools, qui a mis sur le marché des capteurs permettant la mesure de microforces avec des caractéristiques assez adaptées à cette étude préliminaire. Cela nous a ainsi évité de concevoir et de réaliser en salle blanche des outils adaptés. Le préhenseur ainsi réalisé est présenté sur la figure 3.12. Chaque capteur commercial possède une pointe à l'extrémité de laquelle une force peut être appliquée selon l'axe de cette pointe. Cette force engendre un déplacement de la pointe et un principe de mesure capacitif est exploité pour déduire l'effort appliqué. Chaque capteur est monté sur un porteur robotique pour générer des déplacements relatifs d'une pointe par rapport à l'autre ou un mouvement simultané des deux pointes par rapport à un substrat. Il nous est alors possible de réaliser différentes tâches comme prendre un composant, le guider dans un rail, l'insérer ou le déposer.

Cette plateforme a été très utile puisqu'elle nous a permis, dans un premier temps, d'étudier le comportement d'un microcomposant pendant les différentes étapes de sa manipulation. Nous avons ainsi pu établir le modèle liant le déplacement du composant et les forces de serrage (forces qu'il subit en raison de la précharge exercée par les pointes des capteurs F_{y1} et F_{y2}) et les forces de contact (forces appliquées par l'environnement c'est-à-dire tout ce qui est externe au préhenseur, il peut s'agir d'un autre composant par exemple) représentées par F_x , F_y et F_z sur la Figure 3.13(a).

Nous avons, par exemple, pu observer qu'une force latérale F_y induit une succession de deux mouvements visibles sur la Figure 3.13(b) :

- lorsque F_y est faible (inférieure à une limite, $F_y = 85 \mu m$ dans notre cas) sur la Figure 3.13(b)), le composant subit un déplacement en translation selon la direction de la force, les contacts entre le composant manipulé et les doigts de serrage restent plans et assurent ainsi une bonne stabilité mécanique du composant ;
- lorsque F_y dépasse cette limite, le composant subit une rotation entre les doigts de serrage, les contacts mécaniques deviennent ponctuels et la stabilité du composant n'est plus assurée.

Ces observations, établies sur la base de mesures corrélées à des modèles physiques, ont permis

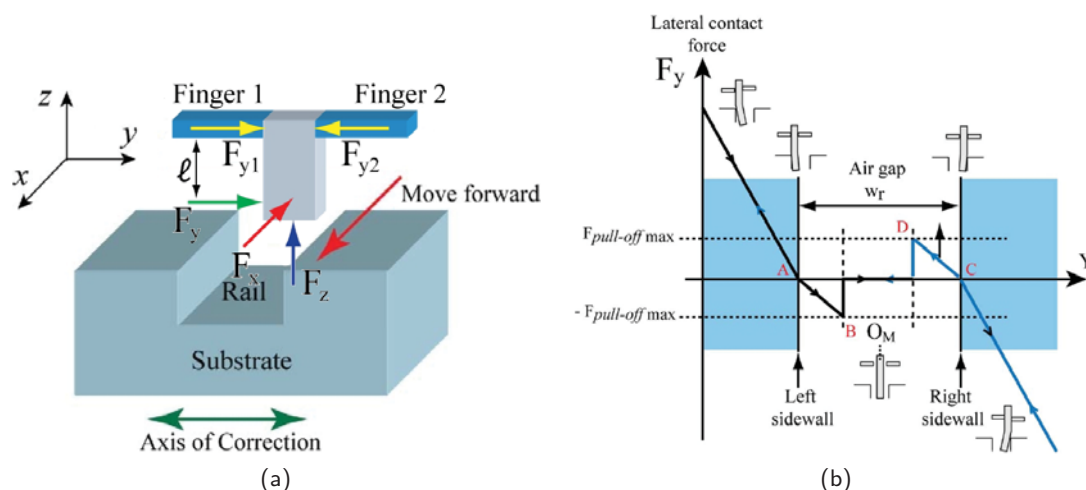


FIGURE 3.14 – Guidage d'un composant dans une rainure : (a) Schéma de principe du guidage selon l'axe X (b) Stratégie de guidage associée intégrant la prédominance des forces de pull-off.

d'établir selon chaque direction, des seuils de force à ne pas dépasser pour garantir une prise stable du composant. Le modèle proposé conduit également à une estimation fiable la position du composant (erreur inférieure à 10 %) et à la détermination de différents paramètres comme la vitesse à ne pas dépasser pendant un assemblage. A l'inverse, il nous a été utile lors de la conception du préhenseur intégré (voir Chapitre 5) notamment pour déterminer sa raideur.

Cette première étude nous a également conduit à la réalisation de tâches automatisées de guidage d'un composant dans une rainure (Figure 3.14(a)). Pour cela, nous avons mis en œuvre une commande hybride force-position de type externe, permettant de commander les axes X et Z en position et l'axe Y en force. Les travaux menés nous ont amenés aux deux conclusions intéressantes :

- la présence des forces de pull-off engendre un collage du composant à chaque fois qu'il entre en contact avec l'environnement (typiquement le rail pendant une guidage). Poursuivre le mouvement d'avancée du guidage induit alors une perte du composant, et ceci, très rapidement. Nous avons alors testé avec succès une stratégie originale de guidage (voir Figure 3.14(b)) consistant à enlever tout contact avant d'effectuer un guidage. Ainsi, lorsqu'un contact apparaît, le mouvement selon X est alors stoppé jusqu'à ce qu'un mouvement selon Y permette d'enlever le contact établi ;
- la dynamique de création ou d'annulation des contacts est un point particulièrement clé et a donné suite à des investigations spécifiques présentées ci-après.

Ces travaux d'assemblages automatisés par commande hybride force-position ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Kanty Rabenoroso et ont conduit à des résultats originaux (modélisation multiphysique, stratégie d'assemblage). Ils ont conduit à des publications dans des revues (J9 et J1), des conférences (C16, C20, C23, C24) et ont également contribué à ce que Kanty obtienne le prix de thèse de l'école doctorale. L'approche étudiée dans ces travaux, est de type quasi-statique et exploite un préhenseur non-intégré, et a été approfondie dans le cadre de la thèse de Bilal Komati, qui a développé une micropince intégrée et instrumentée en force, le modèle multi-physique dynamique de ce préhenseur et la commande hybride force-position dynamique permettant l'assemblage du micro-banc-optique (ces différents travaux font l'objet du chapitre 6).

3.3.5/ CARACTÉRISATION DES ASSEMBLAGES RÉALISÉS

Si l'assemblage de composants complexes a pu être réalisé en mode téléopéré et automatique, l'objectif de tout processus d'assemblage est de fabriquer des produits, dont les performances respectent un cahier des charges pré-défini. De ce fait, il est important de pouvoir qualifier et quantifier les performances du produit après son assemblage. Outre ce besoin lié au produit, il est également particulièrement important de pouvoir analyser les sources d'imprécisions (erreurs de conception du produit ou des outils de préhension, erreurs de stratégie d'assemblage, erreurs de fabrication...) afin de comprendre les clés d'un assemblage réussi.

Dans la littérature, très peu de travaux conduisent à la réalisation de micro-assemblages complexes [Das et al., 2008a, Dechev et al., 2004b]. L'étude des performances de produits assemblés est ainsi encore moins présente et repose plutôt sur des approches d'assemblage actif, qui consiste à utiliser une fonctionnalité du produit assemblé pour contrôler son assemblage. Nous pouvons principalement noter les travaux de Dan Popa, qui présente les performances atteintes par un microspectromètre assemblé [Das et al., 2009]. Toutefois, ce type d'approche repose sur un modèle liant la qualité de l'assemblage réalisé au comportement du système assemblé et inversement... Nous n'avons pas identifié d'étude générique conduisant, par exemple, à quantifier la précision de positionnement d'un composant après son assemblage. Cela est notamment dû à la difficulté de mise en œuvre de moyens de caractérisation des assemblages réalisés, qui nécessitent une mesure multi-DDL dans un volume très restreint.

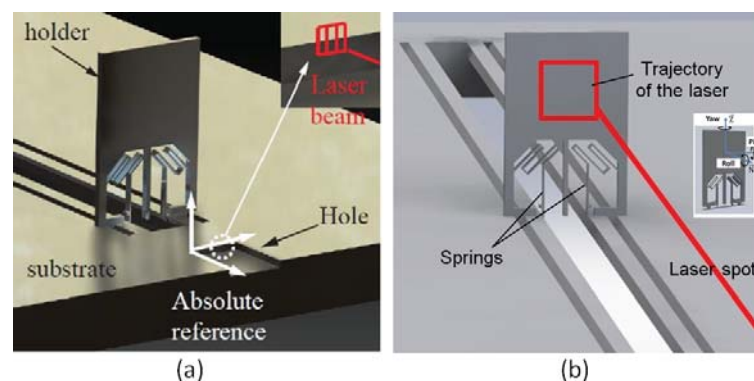


FIGURE 3.15 – Principe de mesure de la position d'un composant optique par balayage d'un laser de mesure : (a) prise de référence grâce à une ouverture de référence réalisée sur le substrat (b) trajectoire du laser sur le composant optique pour en déterminer sa position/orientation par rapport à la référence.

Afin de mener une première étude et de mesurer la position des composants après assemblage, nous avons choisi :

- de réaliser des campagnes d'assemblage des composants optiques présentés en section 3.2.1 ;
- de réaliser ces assemblages en mode téléopéré en utilisant la plateforme présentée en section 3.3.2 ;
- de mettre en œuvre un moyen de mesure de la position des composants optiques après leur assemblage en utilisant un capteur laser Keyence couplé à un système de nanopositionnement présenté en Figure 3.9. Ce dernier permet la réalisation de trajectoires de mesure, dont on peut déduire trois mesures par rapport à une référence (voir Fig 3.15) : la position du composant selon l'axe de mesure et son orientation selon les deux axes perpendiculaires.

Ces travaux ont permis de réaliser des dizaines d'assemblage à l'issue desquels la position du

composant optique est mesurée, puis comparée à la cible visée. Nous avons notamment pu constater, qu'il était possible d'améliorer la position d'un composant grâce aux choix préalablement effectués, notamment le préhenseur actif et la conception des composants optiques permettant une réversibilité des liaisons mécaniques. Une position non satisfaisante peut alors être améliorée, les détails techniques étant indiqués dans l'article [Clévy et al., 2014]. Ces travaux ont montré, qu'il était possible d'assembler des composants optiques, avec une erreur de position selon l'axe optique inférieure à $1\ \mu m$ et des erreurs angulaires inférieures à $0,1^\circ$.

Suite à ces travaux, il serait tout à fait intéressant d'étudier la précision de positionnement de composants optiques assemblés automatiquement. Cela permettrait d'approfondir les principales sources de défauts affectant la précision des assemblages. Celles les plus probables sont les choix de conception des liaisons mécaniques composant-substrat et composant-outils de préhension, la qualité de la microfabrication et les trajectoires réalisées.

Ces travaux permettant de quantifier la précision de micro-assemblages ont été réalisés lors du post-doctorat de Ion Lungu et du stage de Jean-Philippe Mascaro. Ils ont conduit à la publication d'un article de revue [J14] et de deux articles de conférences [C22] et [C25].

3.4/ SYNTHÈSE DES PROBLÉMATIQUES SCIENTIFIQUES ET ORIENTATION DES TRAVAUX

Les différentes études conduites, pendant la première phase de mes travaux (entre 2006 et 2010), ont permis de montrer qu'il était tout à fait possible de réaliser des micro-assemblages complexes, précis et qu'il était également possible de les automatiser, et ceci, par plusieurs approches.

Ces travaux ont également validé l'approche par préhenseur actif, qui constitue une originalité de nos travaux et qui apporte également une grande versatilité utile à la réalisation de tâches complexes et diversifiées. Cette approche s'est d'ailleurs traduite par la création de Percipio Robotics (voir détails en au chapitre 7).

Nous avons également constaté que la problématique du micro-assemblage complexe et précis comporte non pas un verrou principal, mais plutôt plusieurs liés entre eux qu'il s'agisse de problématiques scientifiques (difficulté de modélisation, de commande, d'identification, de compréhension de comportements) ou technologiques (difficultés de mesure, d'actionnement, d'atteindre une précision désirée). Pour cette raison, la seconde phase de mes travaux (2006 à 2015) a conduit à l'étude de plusieurs axes de recherche.

En premier lieu, nous avons souhaité étudier la problématique de la mesure dans son ensemble qu'il s'agisse de mesure de positions ou de forces. Dans les deux cas, il est fondamental, que les mesures réalisées puissent permettre de très grands rapports plage de mesure/résolution, que les capteurs proposés soient les moins encombrants et qu'ils permettent d'effectuer des mesures les plus directes possibles. Concernant la mesure de force, celle-ci permettra de prendre en compte les forces de contact ce qui requiert par ailleurs une mesure dynamique. Concernant la mesure de position, un des principaux challenges additionnels sera de réaliser des mesures dans l'espace, ou au moins selon plusieurs directions simultanément.

Le second constat, que nous avons fait, concerne les porteurs robotiques. Comme pour de nombreuses études de la littérature, nous avons acheté des axes de micro et nanopositionnement (guidage mécanique à jeu ou par structure déformable sans jeu) que nous avons assemblé pour obtenir une cinématique désirée. Les travaux conduits nous ont permis de comprendre que ces

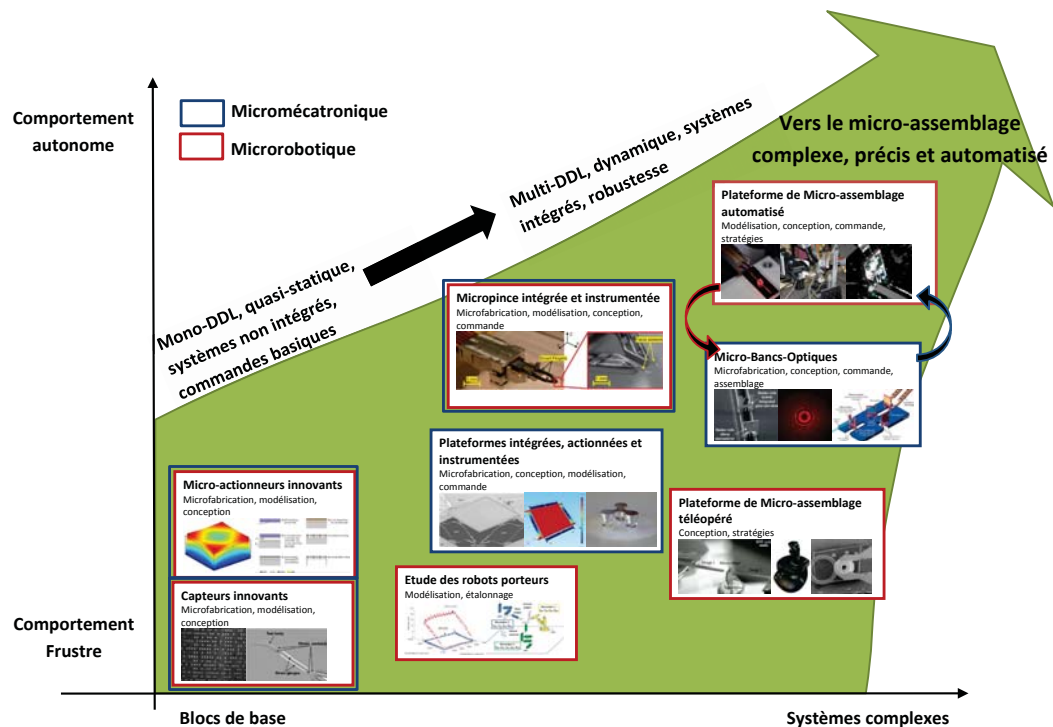


FIGURE 3.16 – Principaux objets d'étude de mon activité scientifique contribuant au micro-assemblage complexe, précis et automatisé. Chaque bloc constitue un objet d'étude mettant en œuvre différents outils explicités en sous-titres. Les liens entre objets d'études ne sont pas explicités sur ce graphique pour faciliter sa lisibilité, mais tous les objets d'études "complexes-autonomes" reposent sur l'ensemble des objets d'études plus élémentaires.

structures induisent des erreurs de positionnement conséquentes conduisant à des difficultés lors de phases d'étalonnage. Nous avons également constaté, que des porteurs robotiques de structures trop complexes sont néfastes (trop grand nombre de DDL du à des redondances entre axes de micro et nanopositionnement). Réaliser des micro-assemblages complexes et précis nécessite de pouvoir contrôler précisément les mouvements élémentaires des porteurs robotiques. L'importance de cet enjeu nous a amené à effectuer deux études dans des directions différentes :

- le manque de connaissances sur le comportement et la précision réelle de ces porteurs (technologies récentes), nous a conduit à un axe de recherche consistant à les étudier, quantifier leur précision et déterminer les paramètres influents. Cette étude repose en partie sur le développement de nouveaux moyens de mesure ;
- les porteurs robotiques utilisés pour du micro-assemblage sont plusieurs centaines de fois plus volumineux, que leurs homologues à l'échelle macroscopique en regard des dimensions des objets qu'ils manipulent. Ce point constitue probablement une des raisons majeures du manque de précision des porteurs robotiques que nous avons observé. Compte-tenu de ce point mais également des enjeux de la miniaturisation, nous avons souhaité étudier de nouveaux modes d'actionnement.

Ces principaux constats nous ont conduit à définir plusieurs objets d'études dont les objectifs

sont de :

- proposer des capteurs innovants (force et position) vers un objectif de capteurs intégrés, à grand rapport plage/résolution, multi-DDL et capables de mesures dynamiques ;
- proposer de nouveaux modes d'actionnement innovants permettant des déplacements de très grandes amplitudes dans des volumes restreints et selon plusieurs DDL et avec de grandes bandes passantes ;
- proposer de nouveaux systèmes micromécatroniques intégrés et instrumentés : compte-tenu de l'objectif global des travaux, nous souhaitons étudier en particulier une micropince, une plateforme actionnée instrumentée et des micro-bancs-optiques actionnés ;
- étudier les robots porteurs notamment leur précision et les facteurs influents ;
- étudier la réalisation de tâches complexes, précises et automatisées de micro-assemblage en exploitant la dynamique importante liée à l'échelle micrométrique.

Ces différents objets d'études sont présentés sur la Figure 3.16 et jouent tous un rôle clé pour atteindre l'objectif final consistant à réaliser des tâches de micro-assemblage complexes, précises et automatisées. Ceux-ci sont particulièrement liés, puisque, par exemple, de nouveaux principes de mesure de position ont pour objectif de permettre la mesure de la position de doigts de micropince, de composants pendant leur assemblage, de porteurs robotiques ou de plateformes actionnées. Ces liens trop nombreux ne sont pas explicités sur ce schéma. Cela est également la raison pour laquelle, nous avons retenu les trois axes scientifiques suivants, qui ont été étudiés pendant la seconde phase de mes travaux (2010 à 2015), et qui feront l'objet des trois prochains chapitres :

- étude des robots porteurs, qu'il s'agisse de la quantification des performances des systèmes de micro et nano positionnement, de l'étude des facteurs influents ou de l'amélioration de ces performances (Chapitre 4) ;
- étude et proposition de nouveaux modes d'actionnement de performances particulièrement accrues, puis de nouveaux systèmes microrobotiques intégrés et instrumentés tels qu'une micropince ou des plateformes actionnées (Chapitre 5) ;
- étude de structures de commande et de stratégies de micro-assemblage pour automatiser avec succès des tâches de micro-assemblage complexes et précises (Chapitre 6).

ANALYSE DES PERFORMANCES DES SYSTÈMES DE MICRO ET NANOPOSITIONNEMENT

Le Chapitre 3, a montré que l'usage des systèmes de micro et nanositionnement est très répandu mais, que leurs performances sont mal connues notamment en termes d'exactitude et de répétabilité de positionnement. Pour remédier à ce manque de connaissances, qui influence de manière notable de nombreuses études, le comportement de ces deux types de systèmes est étudié dans ce chapitre. Pour cela, nous proposons une métrique adaptée à l'échelle, ainsi qu'un moyen de mesure multi-DDL à très grand rapport plage de mesure/résolution (supérieur à 10^6). La quantification de l'exactitude et de la répétabilité a ainsi pu être conduite expérimentalement. Associée à une approche par étalonnage géométrique, elle nous a permis de comprendre le comportement des systèmes de micro et de nanositionnement. Cette approche nous a permis d'analyser et d'identifier les défauts influençant le plus l'exactitude. Nous avons ainsi pu les compenser et montrer comment améliorer de 35 fois l'exactitude de positionnement d'un système de micropositionnement $XY\Theta$ et de plusieurs fois celle d'un système de nanositionnement. Les connaissances acquises à travers ces travaux ont été utilisées pour les travaux de micro-assemblage automatisé (section 3.3.3) et ont été poursuivis dans un cadre de transfert industriel (présenté en section 7.2). La plateforme expérimentale utilisée a également fait l'objet d'un transfert vers l'enseignement présenté en section 7.3.3.3.

4.1/ CONTEXTE ET MOTIVATIONS DES TRAVAUX

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la problématique générale du positionnement précis qui concerne de très nombreuses disciplines. C'est par exemple le cas pour : le micro-assemblage [Agnus et al., 2013], la caractérisation de composants de dimensions micrométriques [Abrahamians et al., 2013], la manipulation d'objets biologiques [Sun and Nelson, 2002][Griffith and Akella, 2005], la microscopie par AFM [Requicha et al., 2009] ou par laser [Dagnino et al., 2015]... Toutes ces études requièrent la génération de mouvements complexes, et la qualité de la réalisation de ces mouvements influence directement et fortement les résultats obtenus. Par exemple, dans le domaine des MOEMS, une erreur de positionnement relatif entre deux composants (à l'issue de leur assemblage par exemple) de $1\ \mu m$ est suffisante pour induire des dysfonctionnements conséquents du système [Popa et al., 2009][Aljasem et al., 2011].

Les porteurs robotiques générant ce type de mouvements sont, pour la majorité, constitués des systèmes suivants ou de leurs combinaisons :

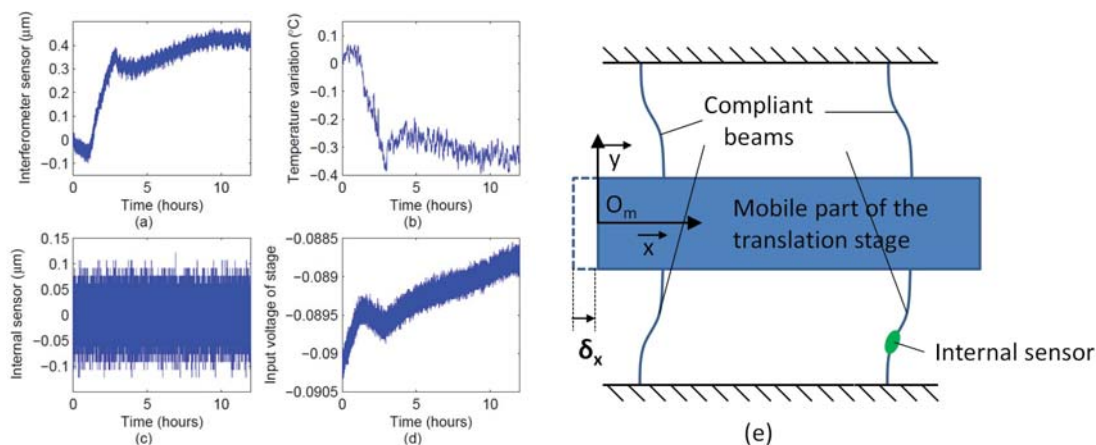


FIGURE 4.1 – Problématique des mesures indirectes : (a) Mesure du déplacement δ_x par un capteur externe de référence (b) Mesure de la température (c) Mesure de la position par capteur interne (d) Tension de commande appliquée à l'actionneur (e) schéma de principe d'un axe de nanositionnement.

- des systèmes robotiques de micropositionnement, que nous définissons comme des systèmes à guidage mécanique comme à l'échelle macroscopique, permettant de grandes courses (quelques mm ou dizaines de mm), mais de mauvaises précisions ;
- par des systèmes robotiques de nanositionnement, que nous définissons comme des systèmes à structures déformables sans jeu, de très bonnes résolutions, mais, de petites courses (quelques centaines de μm maximum) ;
- des microsystèmes.

Ces différentes technologies sont, par ailleurs récentes et, leurs comportements sont encore mal connus d'autant plus que leur compacité est décisive pour les tâches à réaliser contrairement à l'échelle macroscopique, où une précision élevée passe par des structures porteuses plus rigides, souvent plus massives, plus encombrantes et plus lourdes. Ainsi, le niveau de précision qu'un système peut atteindre est mal évalué, tout comme les facteurs influents. Ce déficit de connaissance est accentué par le manque de moyens de mesure adaptés à la mesure de position dans ce contexte dimensionnel. Les normes de référence ne prennent également pas en compte ces difficultés et ces spécificités. Face à l'étendue de ces problèmes, différentes pratiques sont répandues, et ce, souvent au détriment des performances :

- de très nombreux systèmes n'intègrent pas de capteurs et sont alors commandés en boucle ouverte, et ce, malgré de nombreuses non-linéarités et sensibilités à l'environnement ;
- les systèmes intégrant des capteurs souffrent de nombreuses limites technologiques. Ces capteurs effectuent souvent une mesure indirecte : le déplacement effectué n'est pas directement mesuré (manque de place pour intégrer le capteur au bon endroit) mais estimé via un modèle de transformation de mouvement associé à la mesure issue d'un capteur mesurant une déformation ou un déplacement interne, voir Fig. 4.1 ;
- les systèmes de micropositionnement sont souvent associés à des systèmes de nanositionnement conduisant à des structures porteuses complexes et très redondantes (de nombreux cas font état de 10 à 12 DDL) induisant une multiplication des défauts influents ;
- des efforts conséquents sont faits pour mettre en œuvre des principes de mesures extéroceptifs adaptés aux tâches à réaliser (difficulté notamment d'effectuer des mesures à très grand rapport amplitude/résolution selon plusieurs directions de l'espace).

Dans ce contexte général, nous nous sommes tout particulièrement intéressés à l'étude des performances statiques des systèmes de micro et nanositionnement afin d'en modéliser le comportement, d'en déterminer les facteurs influents, d'en quantifier l'exactitude¹ de positionnement et d'en proposer une méthodologie permettant de garantir la meilleure exactitude possible. Le but final étant ici de tirer les meilleures performances intrinsèques d'un système de micro ou nanositionnement afin d'obtenir un porteur de structure cinématique "minimale" pour une exactitude souhaitée.

Pour cela, ce chapitre présente tout d'abord la métrique utilisée, ainsi que la proposition d'un principe de mesure multi-DDL à grand rapport plage de mesure/résolution. Celui-ci est ensuite utilisé pour quantifier l'exactitude de positionnement d'un système microrobotique $XY\Theta$ choisie comme cas d'étude. Une approche par étalonnage géométrique est utilisée pour permettre, d'une part, d'identifier les défauts influents et leur influence relative et, d'autre part, de quantifier l'exactitude de positionnement avant et après compensation de ces défauts. Une étude relative aux systèmes de nanositionnement est ensuite présentée selon le même principe.

4.2/ MÉTRIQUES

Les travaux visant à étudier et quantifier la précision de positionnement s'appuient en général sur plusieurs documents de référence comme la norme internationale ISO 9283 "Manipulating Industrial Robots – Performance Criteria and Related Testing Methods", la norme Américaine ANSI/RIA R15.5 ou le Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM) du Bureau International des Poids et Mesures (BIPM).

Le point de vue robotique de la norme ISO 9283 nous intéresse particulièrement ici et sera à ce titre utilisé comme base de travail, les principaux éléments sont rappelés dans la section suivante. Les autres guides serviront à compléter ce point de vue en y apportant les spécificités liées à l'échelle micrométrique considérée dans ces travaux. Ainsi, la section 4.2.2 présente la métrique que nous avons défini et utilisé.

4.2.1/ NORME ISO 9283

La norme ISO 9283 définit principalement deux critères d'évaluation statiques des robots à savoir l'exactitude et la répétabilité de pose. Leur quantification passe par la comparaison de poses² désirées avec les poses réellement atteintes expérimentalement. Ainsi, la norme indique plusieurs points importants notamment :

- au moins 30 cycles doivent être effectués pour avoir des données statistiquement "suffisantes" ;
- chacun de ces cycles vise à atteindre successivement plusieurs poses de l'espace dont la localisation est définie par la norme ;
- les essais expérimentaux doivent être réalisés dans des conditions expérimentales constantes ou peu variantes (température notamment).

1. L'exactitude de pose est l'écart entre la pose commandée et le barycentre des poses atteintes, définition et protocole de mesure associé issus de la norme ISO 9283.

2. Position de l'organe terminal du robot dans un repère de référence.

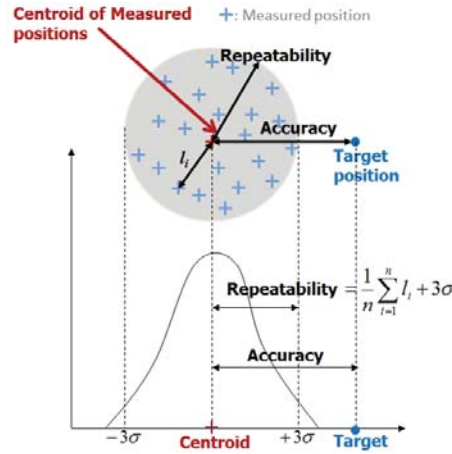


FIGURE 4.2 – Répétabilité et Exactitude selon la norme ISO 9283.

L'exactitude (voir Figure 4.2) de la $j^{\text{ème}}$ pose (AP_j) se caractérise alors comme la distance entre la pose désirée $O_{d_j}(x_{d_j}, y_{d_j}, z_{d_j})$ et le barycentre $G_j(x_{G_j}, y_{G_j}, z_{G_j})$ des i ($1 \leq i \leq n$) poses atteintes (mesurées) $M_{j,i}(x_{M_{j,i}}, y_{M_{j,i}}, z_{M_{j,i}})$ et se quantifie par :

$$AP_j = \sqrt{(\bar{x}_j - x_{d_j})^2 + (\bar{y}_j - y_{d_j})^2 + (\bar{z}_j - z_{d_j})^2} \quad (4.1)$$

$$\text{avec} \quad \bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{M_{j,i}} \quad \text{etc..} \quad (4.2)$$

La répétabilité (RP_j) se caractérise quant à elle par l'étendue du nuage des poses atteintes et se quantifie par le rayon de la sphère définie par l'expression suivante :

$$RP_j = \bar{l}_j + 3\sigma \quad (4.3)$$

$$\text{avec} \quad \bar{l}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(\bar{x}_j - x_{M_{j,i}})^2 + (\bar{y}_j - y_{M_{j,i}})^2 + (\bar{z}_j - z_{M_{j,i}})^2} \quad \text{et} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_{j,i} - \bar{l}_j)^2}{n-1}} \quad (4.4)$$

Chaque pose désirée permettant de calculer une valeur d'exactitude et une de répétabilité, les valeurs indiquées lors de campagnes de test sont généralement la valeur maximum quantifiée.

Ces définitions seront directement utilisées pour les travaux relatifs à l'étude de systèmes microrobotiques (Section 4.4), en revanche elles seront complétées dans la section suivante pour intégrer plusieurs spécificités liées à l'échelle et seront alors utilisées pour l'étude de systèmes de nanositionnement (Section 4.5).

TABLE 4.1 – Exemples de spécificités rendant difficile l'application directe des normes.

Contraintes de la norme ISO 9286	Spécificités d'échelle rendant complexe l'application directe de la norme pour les systèmes de nanopositionnement
La résolution du moyen de mesure externe est bien supérieure à celle des robots caractérisés, elle à ce titre négligée	Les limites des moyens de mesure actuels font que les résolutions du capteur et du robot sont d'ordre de grandeur proche
Les mesures doivent être postérieures à un cycle de pré-chauffe respectant les consignes du fabricant	Ce type de donnée n'est que très rarement donnée par les fabricants de systèmes de micro ou nanopositionnement
Les mesures doivent être faites à une température $\pm 2^\circ\text{C}$, la valeur moyenne de la température doit alors être indiquée mais ses variations sont négligées	A l'échelle micro, une variation ne serait-ce que d'un degré engendre des variations de comportement conséquentes. Par ailleurs, très peu d'environnements permettent de contrôler de ce paramètre de manière suffisante pour en négliger les effets
Les mesures doivent être prises après stabilisation de la pose	Il est bien souvent complexe de séparer comportement transitoire et stationnaire
Le système de mesure doit avoir une dynamique suffisante pour être négligeable et les tests doivent être réalisés à vitesse maximale	Les systèmes de micro et nanopositionnement sont conçus pour être précis et des compromis précision/dynamique sont réalisés, les dynamiques de mesure et du robot sont d'ordre de grandeur proches
Les cycles doivent être répétés 30 fois dans des conditions identiques, les valeurs des paramètres potentiellement influents doivent être consignés dans le rapport d'étude	Difficile de connaître les paramètres influents, de quantifier leur effet donc encore plus de respecter des conditions identiques

4.2.2/ MÉTRIQUE UTILISÉE

Les différentes normes ou guides pré-cités se veulent généraux et ne peuvent pas toujours être directement appliqués ce qui est notamment le cas pour l'étude des systèmes de micro et nanopositionnement. Le tableau 4.1 recense plusieurs exemples importants qui limitent leur usage à l'échelle micrométrique. Cette limite ainsi que l'influence importante de certains paramètres ont conduit les équipes de recherche à utiliser leur propre critère tous différents (erreur absolue, erreur de positionnement, précision, erreur moyenne quadratique...) qui rendent la comparaison des résultats particulièrement complexe. Deux équipes ont cherché à proposer une métrique adaptée, en intégrant notamment les incertitudes de mesure, mais, estiment la précision sous forme de distribution [Popa et al., 2009] ou d'une valeur maximale [Brethé, 2011] ce qui induit un éloignement notable avec l'esprit de la norme.

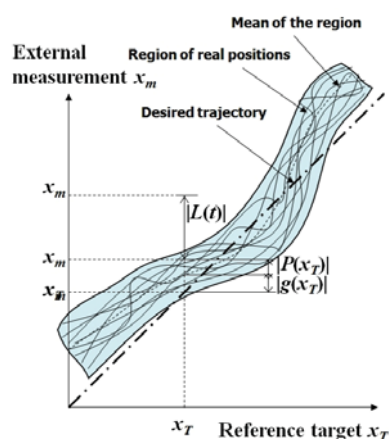


FIGURE 4.3 – Sources d'incertitude d'un système de positionnement.

En conséquence de tout cela, nous avons essayé de proposer une méthode d'estimation de l'exactitude et de la répétabilité plus adaptée aux micro et nano robots tout en essayant de conserver l'esprit de la norme ISO 9283. Celle-ci est présentée ici sous forme d'un problème unidirectionnel afin d'en faciliter la compréhension mais peut être transposé dans l'espace. Nous avons ainsi voulu faire apparaître les principales sources d'incertitudes pour chaque point de mesure m_i , m faisant référence à la mesure et i au numéro du point de mesure. Les différentes sources d'incertitude apparaissent dans l'expression de x_{mi} suivante qui est celle de la $i^{\text{ème}}$ mesure selon l'axe x :

$$x_{mi} = P_i(x_T) + x_T + g_i(x_T) + L_i(t) + S \quad (4.5)$$

où S est l'incertitude de la mesure effectuée avec le capteur externe, $L_i(t)$ intègre les dérives dues à la sensibilité à l'environnement et les erreurs intrinsèques à l'axe de positionnement faisant apparaître deux contributions complémentaires : les erreurs qui font apparaître une tendance reproductible ($g_i(x_T)$), typiquement une dépendance avec la position, donc compensables (partiellement) par étalonnage géométrique et les erreurs qui ne font pas apparaître de tendance ($P_i(x_T)$). La Figure 4.3 illustre ces différentes incertitudes.

Les choix techniques réalisés influencent plusieurs de ces contributions, par exemple, le choix du capteur influence directement S , la qualité du contrôle de l'environnement influence $L_i(t)$ tandis que la conception, la fabrication, la résolution du capteur interne ainsi que les performances du contrôleur de l'axe de positionnement affectent $P_i(x(T))$.

Cette décomposition permet alors de connaître les contributions, en terme d'exactitude ou de répétabilité, des différentes sources de paramètres influents et de les compenser ou d'en réduire l'amplitude. Il est, par exemple, possible de calculer l'exactitude et répétabilité intrinsèques en se plaçant dans un cas où l'incertitude du capteur externe ainsi que les perturbations externes peuvent être négligées. Il est également possible de quantifier l'influence relative des propriétés extrinsèques par rapports aux intrinsèques lorsqu'une variation de température est notée mais que sa contribution sur le comportement global reste faible. Grâce à la détermination de l'exactitude et de la répétabilité pour chaque pose de chaque cycle répété, nous avons ainsi proposé de quantifier la robustesse de l'exactitude selon l'espace R_S ou le temps R_T selon les équations suivantes :

$$\begin{cases} R_S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Max(AP_i) - Min(AP_i)] \\ R_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Max(AP_i)}{Time} \end{cases} \quad (4.6)$$

où R_S représente la dispersion de l'exactitude pour chaque point de l'espace tandis que R_T représente la dérive de l'exactitude au fur et à mesure du temps, donc des cycles réalisés. L'ensemble de cette métrique a été utilisée pour les travaux présentés en section 4.5.

Ces travaux relatifs à l'étude d'une métrique adaptée à l'échelle considérée ont été partiellement réalisés dans le cadre du stage de L. L. LEMOS et de la thèse de Ning TAN et ont été publiés dans J18.

4.3/ PRINCIPE DE MESURE ET DE RÉFÉRENCIEMENT PAR MIRES PSEUDO-PÉRIODIQUES

4.3.1/ PROBLÉMATIQUE ET POSITIONNEMENT DES TRAVAUX

Effectuer des mesures à l'échelle micrométrique comporte de multiples difficultés en raison de l'accès limité à cette échelle (donc de compréhension des phénomènes), mais également compte tenu du cahier des charges que les capteurs doivent assurer : besoin de capteurs très peu encombrants, multi-DDL avec une bonne dynamique et surtout des rapports plage/résolution de mesure très grands. Par exemple, il serait particulièrement intéressant de mesurer les mouvements générés par un système nanorobotique ou un élément mobile de MEMS permettant

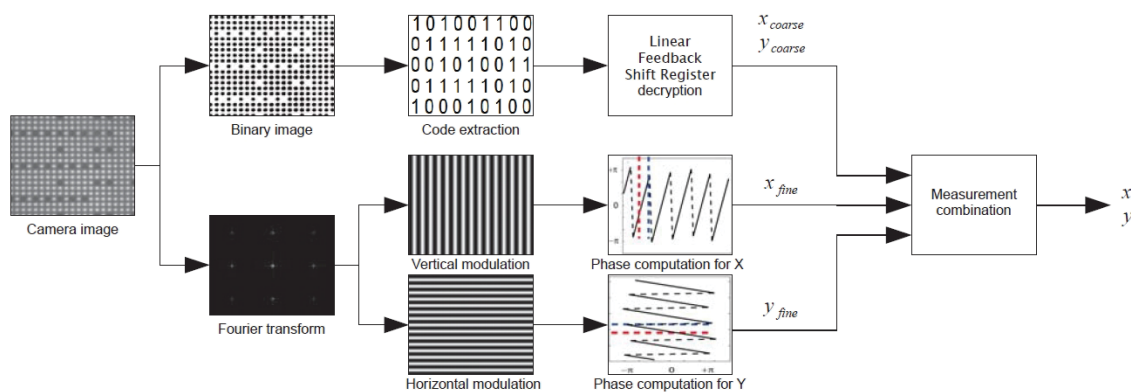


FIGURE 4.4 – Principe de mesure visuelle par mire pseudo-périodique combinant une mesure fine par transformée de Fourier et une mesure grossière par extraction d'un code binaire.

des mouvements typiques de quelques centaines de micromètres de plage et de quelques nanomètres de résolution. Dans le cadre applicatif du micro-assemblage, plusieurs mesures sont particulièrement intéressantes à effectuer : la mesure de la position relative de composants pendant leur assemblage, de la position relative d'outils de préhension entre eux ou par rapport à l'objet à manipuler, ou de la position du composant manipulé ou des outils de préhension par rapport au substrat...

Malgré de très nombreux principes de mesure existant, aucun ne rencontre l'ensemble des spécifications qui seraient typiquement utiles. Par exemple, les capteurs satisfaisant les conditions de plage, résolution, dynamique et à multi-DDL sont des systèmes interférométriques tels que le MEMS Analyseur MSA 500 mais s'avèrent extrêmement encombrants.

Nous avons alors abordé cette problématique complexe en partant du constat que la mesure par vision est la plus répandue à l'échelle micrométrique puisqu'elle constitue un des seuls moyens de mesure multidirectionnel sans encombrer la zone où la mesure doit être effectuée, la caméra étant déportée. En revanche la littérature montre clairement que des traitements d'images et procédures d'étalonnage complexes doivent être mises en œuvre pour obtenir des rapport de plage/résolution de mesure suffisants, ces deux critères étant souvent liés par des compromis. La majorité des mesures engendre ainsi une résolution de la taille des pixels (quelques micromètres), certains travaux font état de résolution subpixelique jusqu'à environ un dixième de pixel.

4.3.2/ PRINCIPE ET MÉTHODOLOGIE

Nous nous sommes intéressés à ce verrou en exploitant des mires périodiques dont les images sont traitées par méthode de corrélation de phase. Ce type de méthode permet d'obtenir une excellente résolution de mesure. Moddemeijer et al. [Moddemeijer, 1991] ont pu, par exemple, obtenir une résolution de 13,3 nm. L'inconvénient majeur de ce type d'approche réside dans le compromis plage de mesure/résolution de mesure qui est typiquement limité par le champ de la caméra choisi.

Pour résoudre ce verrou, nous avons pu créer une collaboration très intéressante avec Patrick Sandoz (département de mécanique de Femto-st). En effet, il avait proposé un principe de mesure par mires pseudo-périodiques pour des applications biologiques dont les performances étaient très prometteuses [Sandoz et al., 303]. La collaboration a pu débuter par une adapta-

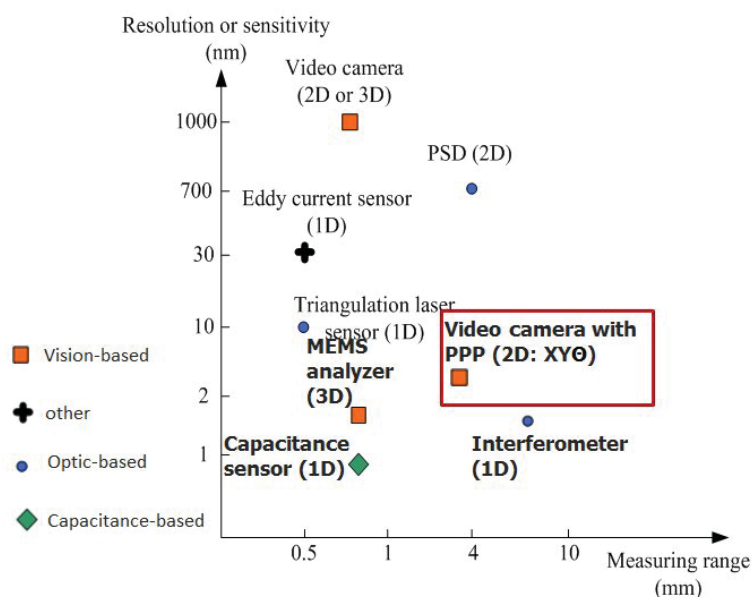


FIGURE 4.5 – Performances de mesure par mires codées (PPP pour Pseudo Periodic Pattern) en regard des capteurs commerciaux.

tion de la méthode aux problématiques de microrobotique. La mire finalement proposée est constituée d'une matrice de points dont le motif dominant reste globalement périodique permettant une mesure très résolue, mais dans lequel un codage binaire est intégré (quelques points spécifiques de la matrice manquent). Ce codage permet alors un repérage de la position de la mire qui est grossier mais absolu. Cette mesure grossière est complétée par une mesure très fine exploitant la répétitivité des motifs. Une transformation de Fourier 2D permet d'extraire les directions principales et la phase de la mire qui, couplée à la période des motifs, permet d'extraire la position relative de la mire dans le repère image. Le principe général de la méthode combinant mesure fine et mesure grossière est présentée en Fig. 4.4 et permet globalement d'obtenir une résolution typique de 10^{-3} pixels pour une plage de mesure théoriquement infinie (limitée par la taille de la mire réalisée) et donc des rapports plage/résolution exceptionnels typiquement de l'ordre de 10^6 . Enfin, d'autres intérêts majeurs de cette approche résident dans le fait qu'elle s'auto-étalonne et qu'elle est particulièrement robuste aux conditions, une image partiellement floue dégrade très peu les performances.

4.3.3/ RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

Les travaux de mesure visuelle par mires pseudo-périodiques permettent d'atteindre une très grande plage de mesure (plusieurs millimètres) pour une résolution de l'ordre de 10 nm et ce pour une mesure dans le plan. La figure 4.5 présente le positionnement des performances obtenues en regard des systèmes commerciaux les plus performants mais qui, pour la grande majorité, induisent un encombrement conséquent dans l'espace où la mesure doit être effectuée. Différents autres résultats importants ont également été obtenus :

- la mesure unidirectionnelle par principe de Vernier a été proposé et a permis d'obtenir expérimentalement les performances suivantes : une plage de mesure de $168 \mu m$, une répétabilité à 3σ de 5 nm et un temps de traitement de $3 \mu s$ limité par l'acquisition de l'image. Ces travaux ont été publiés dans [Guelpa et al., 2014] ;

- l'exploitation de ce principe de Vernier à un système compliant permettant l'estimation de forces via la mesure de déplacements relatifs. Ces travaux, détaillés en section 5.4.2, ont conduit à une publication en revue ([Guelpa et al., 2015]) et aux principales performances suivantes : plage de mesure de 50 mN , résolution inférieure à 50 nN , conduisant à un rapport plage/résolution de mesure de 10^6 .

Les travaux de mesure visuelle par mires pseudo-périodiques ont été exploitées pour l'étude de systèmes de micropositionnement présentée en section 4.4 suivante. Ce moyen de mesure présente de nombreuses perspectives dont certaines sont actuellement à l'étude comme son extension à des mesures spatiales. Des travaux sont également en cours pour permettre une mesure exploitant une mire présente uniquement dans une partie de l'image. Ce type de travaux devrait permettre d'étendre les résultats à de très nombreux champs applicatifs comme le micro-assemblage (mesure de la position d'un composant manipulé ou d'outils de préhension) ou les MEMS (mesure du mouvement d'éléments mobiles).

Ces travaux relatifs à l'étude d'un moyen de mesure multi-DDL et à très grand rapport plage/résolution de mesure par vision et mires codées ont débuté avec Guillaume Laurent et dans un cadre de collaboration avec Patrick Sandoz (département de mécanique de Femto-ST). Cette collaboration très intéressante a servi de cadre au stage de L. L. Lemos, puis du post-doc de J. G. Zea et enfin par la thèse, actuellement en cours, de V. Guelpa. Ils ont conduit à différentes publications : J12 et J16 (mesure unidirectionnelle de position), J20 (mesure unidirectionnelle de force) et C36 (résultat préliminaire en mesure multi-DDL dans le plan).

4.4/ ÉTUDE DES SYSTÈMES DE MICROPOSITIONNEMENT

4.4.1/ APPROCHE PROPOSÉE

Les systèmes de micropositionnement sont considérés ici comme étant des robots de petites dimensions (typiquement quelques dizaines de centimètres au cube) résultant d'une approche descendante (inspirées de concepts de l'échelle macroscopique). Les mouvements sont réalisés via des guidages mécaniques et permettent généralement des courses assez grandes (typiquement quelques dizaines de mm) et de résolution micrométrique ou sub-micrométrique.

De très nombreuses études présentes dans la littérature utilisent ce type de technologies, par exemple dans le domaine de l'instrumentation, de la biologie, des microtechniques, des nanosciences. Malgré leur usage courant, l'importance du contrôle précis des positions et le manque de données des fabricants, peu d'études s'intéressent à quantifier l'exactitude de position ou les paramètres influençant celle-ci. Ce manque de connaissance est aussi induit par la pratique répandue qui consiste à combiner des axes de micropositionnement avec des axes de nanopositionnement afin de réaliser globalement une structure capable de mouvements très résolus. Cependant, une structure mécaniquement et cinématiquement plus complexe induit inévitablement de nouvelles sources réduisant l'exactitude de la structure globale, de nombreux travaux font, par exemple, état de porteurs robotiques de 10 à 12 DDL. L'utilisation d'un capteur permettant une mesure de l'organe terminal du robot associé à une commande en boucle fermée devient alors bien souvent une condition nécessaire, mais également complexe à mettre en œuvre.

Dans nos travaux, nous avons choisi de mener une approche dans une direction opposée aux pratiques explicitées dans la littérature puisque nous avons préféré étudier ces systèmes de micropositionnement pour comprendre les défauts influents sur l'exactitude et, par la suite,

proposer une compensation de ces défauts par étalonnage robotique. Le but final étant ici de tirer les meilleures performances intrinsèques d'un système de micropositionnement afin d'obtenir la structure cinématique "minimale" pour une exactitude souhaitée.

La majorité des systèmes de micropositionnement est constituée de plusieurs axes élémentaires. Ces axes permettent, pour la majorité, de générer des translations ou rotations élémentaires et leur assemblage permet de réaliser une cinématique désirée. De très nombreuses sources de défauts peuvent être considérées comme les défauts géométriques (longueur des bras, défauts de parallélisme et perpendicularité entre deux axes, offsets articulaires et rapports de réduction des transmissions...) ou les défauts non géométriques (déformations dues aux variations de température, gravité, jeux mécaniques, frottements, erreurs d'arrondis dans les calculs, erreur de quantification des codeurs...). La spécificité de l'échelle micrométrique est que toutes ces sources agissent potentiellement et simultanément de manière notable sur l'exactitude de pose. Par exemple, une erreur de perpendicularité de $0,1^\circ$ induit une erreur de position de l'organe terminal de $20\ \mu m$ lorsqu'une translation de $20\ mm$ est réalisée. De même, un axe en translation génère un mouvement qui ne peut pas, à l'échelle micrométrique, être réputé linéaire. Le tangage de $150\ \mu rad$ d'un tel axe induit une erreur de position de l'organe terminal de $5\ \mu m$. L'environnement joue également un rôle important puisqu'une variation de température d' $1^\circ C$, qui est une variation typique dans un environnement contrôlé de type salle blanche, induit une erreur de plusieurs dizaines de micromètres.

La littérature relate plusieurs travaux qui ont étudié l'amélioration de l'exactitude par étalonnage robotique. Ces travaux sont à l'interface de plusieurs communautés : microrobotique, métrologie, machines de précision. Les travaux [Mattos and Caldwell, 2009, Hoover and Fearing, 2007, Das et al., 2007a] ont notamment montré qu'une exactitude intrinsèque de quelques dizaines de micromètres peut être atteinte. Ces travaux mettent en œuvre une mesure par vision pour les raisons (mesure multi-DDL avec performances satisfaisantes) et avec les limites (compromis plage/résolution, résolution limitée au μm) déjà énoncées. Ils utilisent aussi une modélisation comportementale (boîte noire ou grise) qui offre l'avantage de pouvoir compenser de nombreux paramètres potentiellement influents sans connaître leur rôle respectif. Cette approche rend néanmoins complexe la compréhension des phénomènes influents.

Dans un premier temps, nous avons modélisé le système de micropositionnement en intégrant les défauts influençant l'exactitude, nous avons choisi de classer ces défauts selon les trois catégories suivantes (pour des raisons de modélisation mais également de typologie de défauts) :

- les défauts liés aux erreurs de montage du système de micropositionnement ;
- les erreurs le long d'un axe de translation qui dépendent de la position ;
- les erreurs le long de la trajectoire circulaire d'un axe de rotation qui dépendent de l'angle.

La Fig. 4.6 présente sous forme schématique les repères associés à ces trois types de défauts. D'un point de vue générique, nous considérons le repère $\{O_k, \vec{x}_k, \vec{y}_k, \vec{z}_k\}$ comme étant la base d'une liaison k pour un type de défaut donné et le repère $\{O_{k+1}, \vec{x}_{k+1}, \vec{y}_{k+1}, \vec{z}_{k+1}\}$ issu de la transformation incluant le type de défaut considéré. Les transformations font apparaître des paramètres modélisant des défauts de type $a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$, chacun disposant de deux indices, le premier indiquant le type de défaut considéré (assemblage, dépendant de la position ou de l'angle), le second étant le numéro de la liaison considérée.

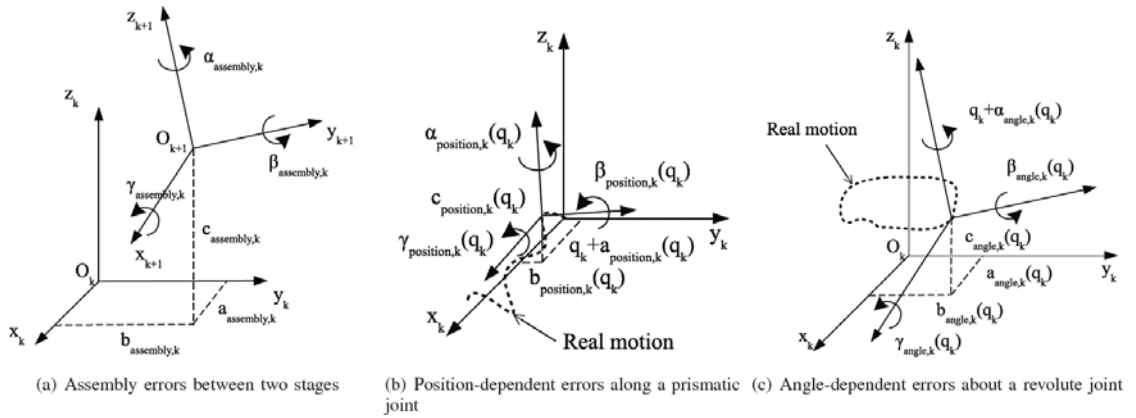


FIGURE 4.6 – Définition des repères et paramètres à identifier.

4.4.2/ ÉTALONNAGE D'UN PORTEUR MICROROBOTIQUE $XY\Theta$

Compte tenu des travaux préliminaires relatifs à la mesure par mires codées offrant une mesure multi-DDL et de très grand rapport plage/résolution de mesure, nous avons souhaité traiter ce problème en mettant à profit une modélisation sous forme de modèle de connaissance couplée à une approche par étalonnage géométrique utilisée dans le but de comprendre quels sont les paramètres les plus influents mais également de quantifier leur contribution respective à l'exactitude globale du système de micropositionnement. Compte tenu des limites de la mesure par mires codées (mesure plane), nous avons choisi comme cas d'étude, un système de micropositionnement de type $XY\Theta$ dont l'utilisation est par ailleurs très répandue. Enfin, l'approche utilisée résulte d'un compromis précision-dynamique, l'objectif étant de privilégier la précision, l'approche retenue est ainsi de type quasi-statique.

La Figure 4.7(a) présente le système expérimental $XY\Theta$ choisi comme cas d'étude. Les repères $WF \{O_{WF}, x_{WF}, y_{WF}, z_{WF}\}$ sont définis comme repère de référence (défini par la position initiale de la mire), $F_1 \{O_1, x_1, y_1, z_1\}$ et $F_2 \{O_2, x_2, y_2, z_2\}$ sont respectivement attachés à la partie mobile des axes de translation X et Y. La translation selon X est portée par x_1 et celle selon Y par y_2 . Le repère $F_3 \{O_3, x_3, y_3, z_3\}$ est attaché à la partie mobile de l'axe de rotation Θ , z_3 définissant l'axe principal de la rotation.

Concernant les défauts considérés, nous sommes limités par le moyen de mesure utilisé (mesure par vision et mire pseudo-périodique présentée en section 4.3), certes multi-DDL et à très haut rapport plage/résolution de mesure mais qui ne permet néanmoins pas d'effectuer des mesures hors-plan. De cela résulte que les paramètres c , β et γ ne sont pas identifiables. Par ailleurs, si de très nombreux défauts peuvent être considérés et sont influents, nous avons choisi de présenter ici 8 paramètres qui nous ont semblé prépondérants (voir Fig. 4.7(b)) dont les 4 suivants sont liés aux erreurs d'assemblage :

- ξ est l'erreur d'alignement entre x_{WF} et x_1 , c'est à dire, entre la mire et la direction principale de la translation X donc $\xi = \alpha_{assembly,1}$. $\xi = 180^\circ$ dans le cas idéal ;
- α est l'erreur de perpendicularité entre les axes X et Y (c'est à dire entre x_1 and x_2 donc $\alpha = \alpha_{assembly,2}$). $\alpha = 0$ dans le cas idéal ;
- (x_R, y_R) définissent les coordonnées du centre de rotation O_3 dans le repère F_2 et intègrent les paramètres $a_{assembly,3}$, $b_{assembly,3}$, et $\alpha_{assembly,3}$.

les 4 paramètres restant, sont, quant à eux liés aux erreurs dépendantes de la position ou de

TABLE 4.2 – Paramètres utilisés pour chacun des 5 modèles. Les étoiles indiquent les paramètres considérés pour chaque modèle, par exemple le premier modèle "géométrique simple" considère les deux paramètres x_R et y_R .

Modèle	Centre de rotation		Paramètres d'assemblage		Erreurs dépendantes de la position		Erreurs dépendantes de l'angle	
	x_R	y_R	ξ	α	ex	ey	f_{ax}	f_{ay}
Modèle I : Géométrique simple	*	*	180	0	0	0	0	0
Modèle II : Géométrique	*	*	*	*	0	0	0	0
Modèle III : Géométrique + position-dépendent	*	*	*	*	*	*	0	0
Modèle IV : Géométrique + angle-dépendent	*	*	*	*	0	0	*	*
Modèle V : Géométrique + position-dépendent + angle-dépendent	*	*	*	*	*	*	*	*

sont identifiables ou non -3- une analyse d'observabilité permettant d'estimer le nombre optimal de poses à utiliser pour l'acquisition des données -4- enfin, l'identification des paramètres via la minimisation de la fonction coût.

Cette approche, bien que couramment établie, n'a été appliquée que pour les modèles I et II. Pour les autres modèles, nous avons utilisé des étapes de pré-étalonnage permettant de compenser les erreurs dépendant de la position (via une table de données et interpolation) et de post-étalonnage pour compenser les erreurs dépendant de l'angle.

4.4.3/ RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

L'étude expérimentale, débute par l'acquisition de mesures (poses commandées, poses atteintes mesurées par le système caméra/mire codée, temps). Pour cela, un ensemble de 1200 poses (compromis issus de l'analyse d'observabilité) balayant l'espace de travail est commandé ($0 \leq x \leq 9,5 \text{ mm}$, $0 \leq y \leq 4,2 \text{ mm}$ et $0 \leq \Theta \leq 360^\circ$). Chaque axe étant commandé en boucle fermée (correcteur PID du constructeur), un délai est observé pour chaque pose commandée afin d'atteindre une "stabilisation" suffisante des mouvements conduisant à une première phase expérimentale d'1h et 20 minutes à l'issue de laquelle les coefficients géométriques ou dépendant de la position sont identifiés. Cette première étape expérimentale se conclut par l'étape de post-étalonnage qui permet d'identifier les défauts dépendant de l'angle.

Une seconde étape expérimentale est alors mise en œuvre après étalonnage afin de quantifier l'exactitude de pose obtenue après quantification de différents défauts. Pour cela, un ensemble de 9 poses réparties dans l'espace de travail est utilisé, ces poses ne faisant pas partie de l'ensemble des 1200 poses utilisées pour l'identification. Ces poses sont utilisées successivement pour chacun des 5 modèles et ce à plusieurs reprises. La Fig. 4.8 présente l'exactitude obtenue pour chaque pose et chaque modèle et permet d'établir différentes conclusions :

- la répétabilité des mesures est toujours inférieure à $0,8 \mu\text{m}$, elle est du même ordre de grandeur que celle fournie par les fabricants et ne présente pas de dépendance avec le temps ou la pose visée ;
- l'exactitude de pose du système de micropositionnement $XY\Theta$ est de l'ordre de $100 \mu\text{m}$

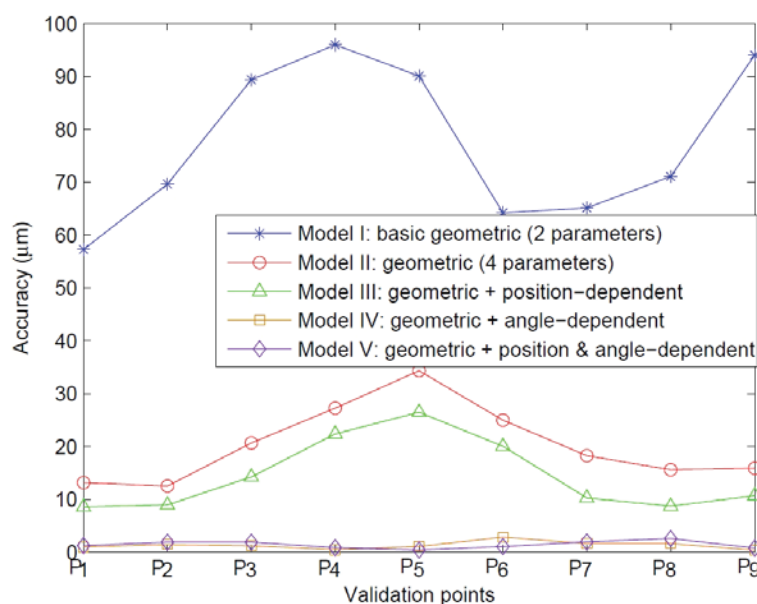


FIGURE 4.8 – Résultats expérimentaux présentant l'exactitude de positionnement obtenue induite pour chacun des 5 modèles.

(pour des axes élémentaires affichant une résolution de 100 nm). Cette exactitude présente une dépendance importante selon les axes X et Y qui est liée aux défauts ξ et α non compensés pour le modèle I ;

- la compensation de ces deux défauts (modèle II) permet d'obtenir une exactitude de $35\text{ }\mu\text{m}$ qui montre une dépendance avec l'angle. Par ailleurs, les poses pour lesquels l'angle commandé est plus grand induisent une exactitude également plus grande ;
- la compensation de ces défauts dépendant de l'angle (modèle IV) permet d'obtenir une exactitude de $3\text{ }\mu\text{m}$;
- la compensation des défauts géométriques ainsi que ceux dépendant de la position (modèle III) conduit à une exactitude de $26\text{ }\mu\text{m}$. La seule compensation des défauts dépendant de la position permet d'améliorer (réduire) l'exactitude de $9\text{ }\mu\text{m}$ (différence entre les résultats issus des modèles II et III) ;
- la compensation de l'ensemble des défauts étudiés (modèle V), conduit à une exactitude de $2,5\text{ }\mu\text{m}$.

Cette étude permet ainsi de montrer qu'en mettant en œuvre un principe de mesure multi-DDL de rapport plage/résolution de mesure très important en regard de la littérature, il est possible d'observer et de quantifier avec précision certains défauts influents. Ce principe de mesure associé à un principe d'étalonnage robotique a également permis de quantifier l'exactitude de pose d'un système de micropositionnement (de l'ordre de $100\text{ }\mu\text{m}$) et de déterminer les principales sources l'affectant qu'ils soient de nature géométrique (défauts de montage des axes, erreurs de longueurs des bras) ou de nature non géométrique (erreurs dépendant de l'angle ou de la position). La compensation de ces défauts montre qu'il est possible d'améliorer de manière très notable l'exactitude de pose puisqu'un facteur de 35 est atteint ici. La Fig. 4.9 permet de situer les performances obtenues en regard d'autres travaux de la littérature et permettent notamment de montrer qu'il est tout à fait possible d'atteindre en boucle ouverte, une exactitude comparable aux systèmes de micropositionnement commandés en boucle fermée lorsque l'on dispose d'une connaissance suffisante de leur comportement. Nous avons également pu vérifier tout l'importance d'un étalonnage de qualité même pour des commandes en boucle

fermée (par exemple dans le cadre des travaux d'automatisation d'assemblage par stéréovision présenté en Section 3.3.3).

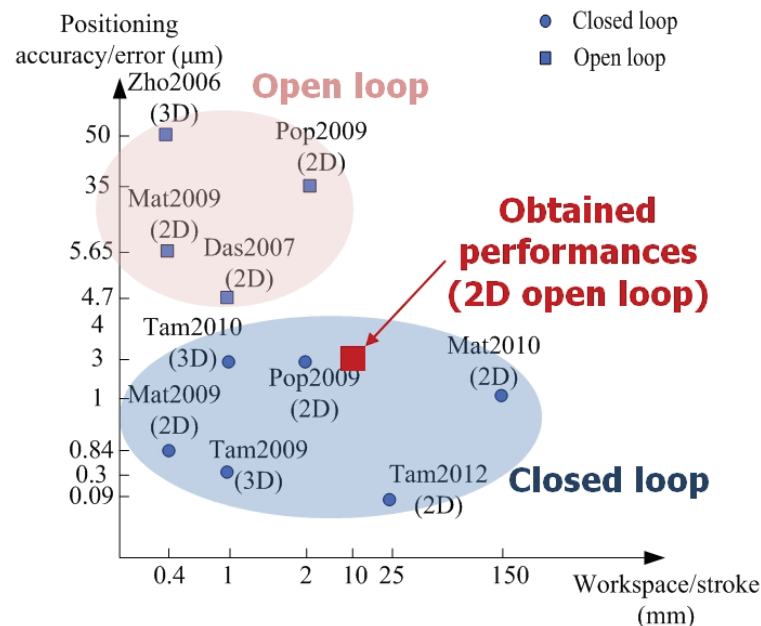


FIGURE 4.9 – Positionnement des résultats obtenus en regard de l'état de l'art³

D'un point de vue méthodologique, la méthodologie de l'étalonnage retenue est relativement complexe (étapes de pré et post-étalonnage nécessaires pour l'identification de tous les paramètres) en regard des principes couramment utilisés. Une analyse plus approfondie du principe de l'étalonnage aurait pour intérêt de réduire cette complexité en permettant peut être de conduire à une identification simultanée de tous les paramètres, les essais réalisés en ce sens n'ayant pas donné satisfaction.

Ces travaux relatifs à l'étude des systèmes de micropositionnement ont été partiellement effectués dans le cadre du stage de V. CHALVET et S. ALVO puis de la thèse de N. TAN. Ils ont conduit aux publications suivantes : J23 (Article dans T-Ro relatif à l'étalonnage d'un porteur 3DDL), C36 (résultat intermédiaire sur un système de micropositionnement XY compensant des défauts géométriques et dépendant de la position), C32 (résultat intermédiaire exploitant la technique d'auto-étalonnage). Les connaissances acquises à travers ces travaux ont été utilisées pour les travaux de micro-assemblage automatisé (section 3.3.3), ont été poursuivis dans un cadre de transfert industriel (présenté en section 7.2) et la plateforme expérimentale utilisée a également fait l'objet d'un transfert vers l'enseignement (présenté en section 7.3.3.3).

4.5/ ÉTUDE DES SYSTÈMES DE NANOPositionnement

Les systèmes de nanopositionnement sont constitués d'un ou plusieurs axes dont les mouvements élémentaires sont réalisés par un matériau actif déformant une structure mécanique partiellement souple. Les mouvements réalisés sont ainsi, pour la majorité, des translations, sans jeu, de courses faibles (inférieures à 2 mm) mais d'excellente résolution (nanométrique)

3. Les éléments de références indiqués dans la figure correspondent aux références bibliographiques suivantes : [Zhou et al., 2006] [Popa et al., 2009] [Mattos and Caldwell, 2009] [Das et al., 2007a] [Tamadazte et al., 2010] [Tamadazte et al., 2009] [Matsumoto et al., 2010] [Tamadazte et al., 2012]

et de bonne dynamique (quelques centaines de Hertz). Ce type de système est très souvent associé à des systèmes de micropositionnement afin de leur apporter une très grande résolution de mouvements et se veulent compactes et légères. Cette pratique est contraire à celle généralement utilisée en robotique "macroscopique" ou en métrologie pour lesquelles améliorer la précision passe par des structures plus rigides, souvent plus massives et plus lourdes.

L'usage des systèmes de nanositionnement est, au même titre que les systèmes de micropositionnement, très répandu et leur bonne utilisation influence directement et largement le résultat des études les impliquant [Shan and Leang, 2012]. Les applications les plus exigeantes mettent en œuvre des systèmes équipés de capteurs internes associés à une commande en boucle fermée (environ la moitié des cas présents dans la littérature)[Devasia et al., 2007]. Cependant, l'extrême difficulté d'intégration de capteurs adaptés impose souvent une commande en boucle ouverte [Wang et al., 2014b][Hiemstra et al., 2014][Clark et al., 2015] ou implique une mesure indirecte (par ex. l'usage de jauges de déformation est répandu) couplée à un modèle de comportement permettant d'estimer le mouvement réalisé. Ce premier verrou associé à un comportement globalement non linéaire (principe d'actionnement et de transformation des mouvements) et fortement dépendant des paramètres de l'environnement affectent globalement l'exactitude.

Ce type de problématique a déjà été abordé dans les domaines de la métrologie ou des machines d'usinage de précision mais sous un angle différent (conception de structures massives et complexes, intégration de capteurs encombrants mais hautement performants, utilisation d'environnements contrôlés, exploitation des modèles mécaniques et thermiques complets des structures porteuses, exactitude visée meilleure d'un ordre de grandeur). Des travaux ont notamment permis d'étudier différentes techniques de compensation des dérives thermiques, qu'il s'agisse du placement optimal des capteurs [Zhu, 2008][Krulwich, 1998][Lubrano, 2011], de l'estimation de la réponse thermo-mécanique des structures [Fraser et al., 1998][Zhao et al., 2007] et la robustesse de ces différentes approches [Zhu, 2008]. Ces travaux portent sur des structures robotiques différentes et pour lesquelles les enjeux sont également différents, ils ne sont pour la majorité pas directement applicables à l'étude des systèmes de nanositionnement.

Dans ce cadre, nous avons souhaité étudier les systèmes de nanositionnement, notamment quantifier le niveau d'exactitude qu'il était possible d'atteindre, tout en déterminant les défauts les plus influents sur celle-ci. Comme pour l'étude des systèmes de nanositionnement, nous avons également procédé par le choix d'un type de système très répandu, le choix d'un principe de mesure, puis réalisé l'étalonnage de ce système pour quantifier expérimentalement son exactitude avec et sans compensation de défauts.

4.5.1/ APPROCHE ET MODÉLISATION

L'étude a ainsi porté sur un axe de nanositionnement en translation (cas présenté dans ce document, axe P-615.1 CD de chez Physik Instrumente) puis a été étendu à des systèmes multi-directionnels pour lesquels les translations élémentaires sont commandés en boucle fermée (avec capteurs internes effectuant une mesure indirecte). Le choix d'un principe de mesure externe s'est porté sur un interféromètre à plusieurs têtes de mesure (SP-S 120 de chez SIOS Meßtechnik GmbH) dont les variations de température et de pression sont compensées. L'utilisation du GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) nous a permis de considérer les différentes sources d'incertitude (intrinsèque au moyen de mesure, à sa mise en œuvre et dues à l'environnement) puis de quantifier l'incertitude standard combinée qu'il induit dans les conditions dans lesquelles nous l'avons utilisé, à savoir 41 nm. La Figure 7.2 présente

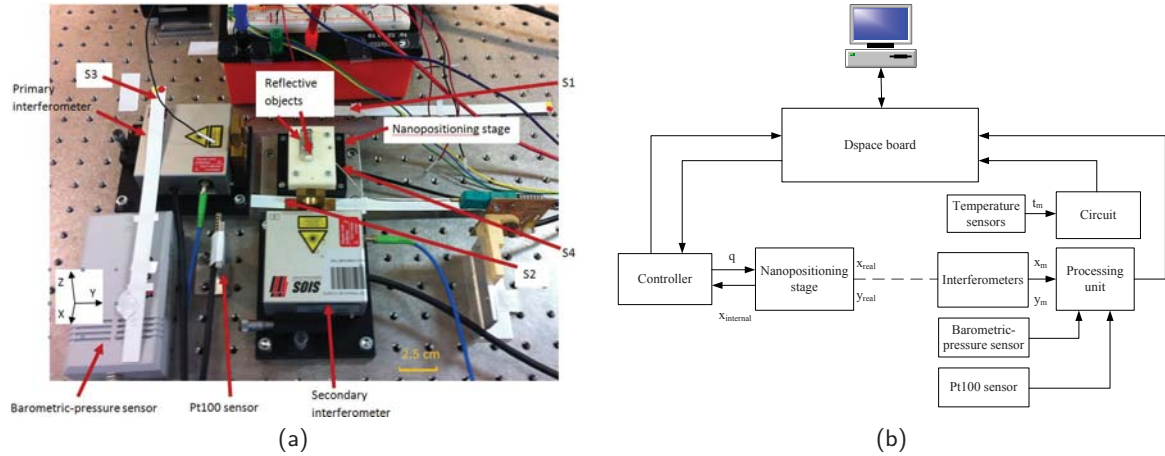


FIGURE 4.10 – Système expérimental constitué d'un axe de nanopositionnement, de deux têtes d'interféromètres, 4 capteurs de température, un capteur de pression et un capteur du degré d'hygrométrie : (a) Photo du système (b) Schéma de l'interfaçage correspondant.

le système expérimental utilisé indiquant notamment la position des quatre thermocouples.

Une première phase expérimentale, nous a permis de comprendre comment isoler certains paramètres influent, notamment des défauts géométriques et des défauts non géométriques (principalement l'influence de la température de l'environnement), la Fig. 4.11 présente des résultats typiquement obtenus expérimentalement permettant de quantifier ces deux types de défauts. Cette étape, couplée aux résultats présents dans la littérature [Lubrano and Clavel, 2008][Li et al., 2009] ainsi que des compromis complexité-précision, nous ont conduit à modéliser le comportement géométrique par un polynôme d'ordre $n_1 = 3$ et le comportement thermique par une relation affine conduisant au modèle complet suivant :

$$q = \sum_{i=1}^{n_1} a_i x^{n_1-i+1} + \sum_{j=1}^{n_2} b_j t_j + \lambda \quad (4.8)$$

Dans, ce modèle, q est directement la position commandée appliquée à l'axe considéré, x la mesure de la position effectuée par le capteur externe pendant la phase d'étalonnage, t_j la température mesurée par le $j^{\text{ème}}$ thermocouple, a_i , b_j et λ les coefficients à identifier lors de l'étalonnage. A l'issue de l'identification, le capteur externe n'est plus utilisé que pour quantifier l'exactitude de l'axe de nanopositionnement, x correspondant à la pose désirée et q la commande à appliquer en vue d'atteindre cette pose désirée malgré les défauts.

4.5.2/ ANALYSE DES PERFORMANCES D'UN PORTEUR 1 DDL AVANT ET APRÈS ÉTALONNAGE

Comme pour l'étude des systèmes de micropositionnement, plusieurs modèles ont été utilisés successivement chacun compensant différents défauts afin de quantifier l'influence relative de chaque défaut. Ainsi, trois modèles ont été considérés, la Figure 4.12(a) présentant l'exactitude et la répétabilité obtenue par chacun d'entre eux à l'issue de l'étalonnage (après $t = 0$) :

- un modèle sans aucune compensation ($q = x$) qui est typiquement utilisé dans la majorité des travaux de la littérature. Ce modèle est intitulé "no model" dans la Fig. 4.12 ;

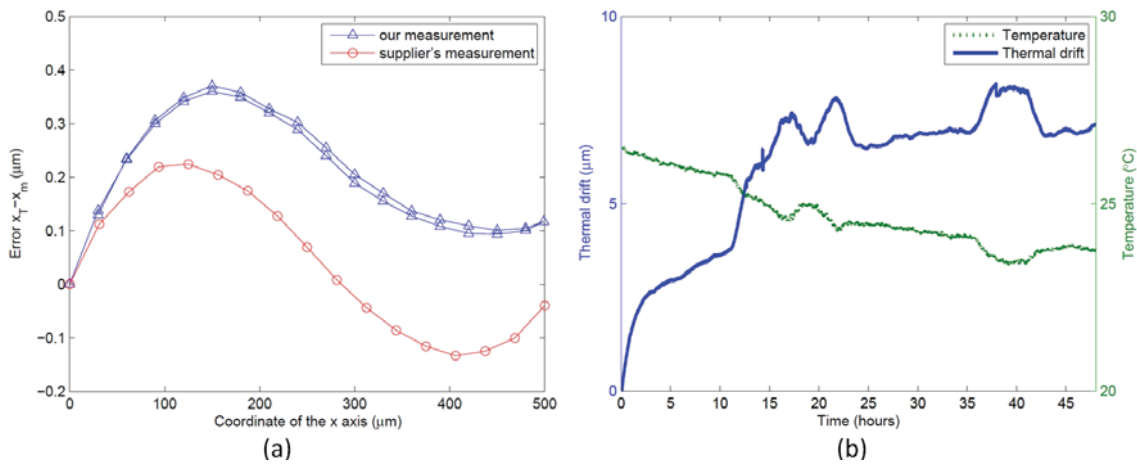


FIGURE 4.11 – Défauts influençant l'exactitude d'un système de nanositionnement : (a) défauts géométriques, x_T étant la consigne et x_m la position mesurée par le capteur externe, les deux courbes bleues correspondent aux positions atteintes à l'aller puis au retour (b) dérive de la position (thermal drift) dépendant des variations de la température de l'environnement.

- le modèle défini par l'équation 4.8 intégrant une compensation des effets géométriques et thermiques. Ce modèle est intitulé "Single Model" ;
- un modèle "adaptatif" défini par cette même équation mais dans lequel le coefficient λ est ré-identifié à chaque début de cycle de caractérisation utilisant ce modèle. Le recalage effectué via un capteur externe définissant un "kilomètre zéro", l'interféromètre étant utilisé pour cette étude. Ce modèle est intitulé "Adaptive KMZ".

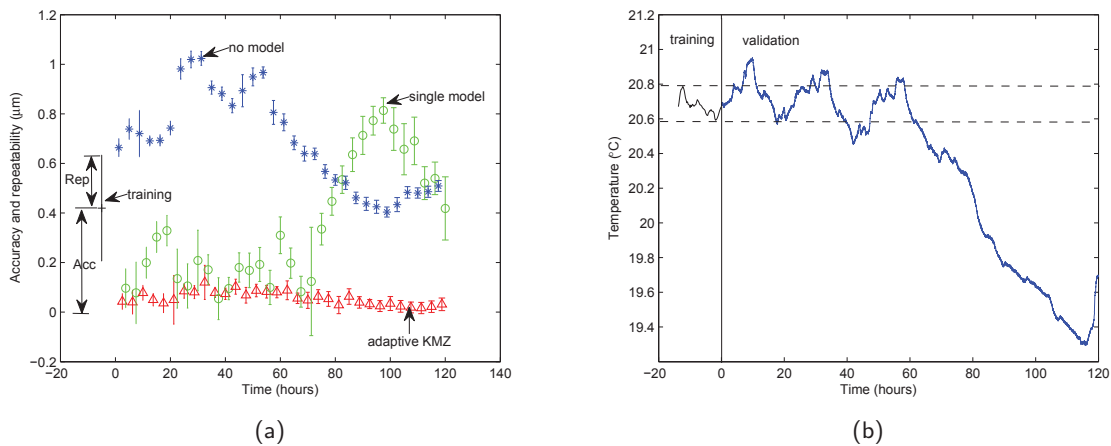


FIGURE 4.12 – (a) Exactitude et répétabilité d'un axe de nanositionnement avant et après étalonnage où trois modèles sont utilisés : commande directe de l'axe sans compensation ("No calibration"), compensation de défauts géométriques et dérives thermiques ("Single Model") et avec recalage du modèle ("Adaptive Model") (b) Evolution de la température pendant l'étude expérimentale.

Parallèlement, la Figure 4.12(b) présente l'évolution de la température mesurée pendant et après étalonnage. Les résultats de l'expérience présentée ici montrent que sans étalonnage, l'exactitude du système de nanositionnement est de l'ordre d' $1 \mu\text{m}$ (valeur grande donc mauvaise exactitude). Le modèle proposé permet quant à lui de compenser de manière rela-

tivement efficace tant les défauts géométriques que ceux issus des variations de température lorsque celle-ci varie dans la même plage que pendant l'étalonnage (ce qui est le cas pendant les 70 premières heures de l'expérience), l'exactitude reste ainsi toujours inférieure à 400 nm. Lorsque la température varie dans une plage trop différente de celle de l'étalonnage, le modèle proposé ne compense plus de manière efficace les dérives thermiques. Le modèle "adaptatif" induit de son côté une exactitude toujours inférieure à 100 nm que la température varie dans la même plage que pendant l'étalonnage ou pas. Ces différents résultats sont confirmés plus précisément en utilisant les critères de robustesse définis en Section 4.2.2 et dont les résultats sont présentés dans le tableau 4.3. Suite à ce constat, nous développons actuellement un principe de détection, pouvant être intégré aux systèmes de nanositionnement et pouvant servir de référence. Ce principe repose sur l'exploitation d'un levier d'AFM (acronyme Anglais pour Microscope à Force Atomique) conducteur électriquement, donc un contact mécanique induit une détection électrique et permet d'identifier la position de cette occurrence (et donc de ré-identifier λ de temps en temps).

TABLE 4.3 – Critère de robustesse de différents modèles pour l'étalonnage d'axe de nanositionnement

	Sans modèle	Modèle simple	Modèle adaptatif
Robustesse selon l'espace R_S	0,34	0,057	0,049
Robustesse selon le temps R_T	0,0058	0,0029	0,0005

Ces travaux ont été étendus à un système de nanositionnement à deux axes de translation et ont permis de constater que l'exactitude atteint 1.4 μm sans compensation et que cette valeur a pu être réduite à 200 nm après compensation des défauts géométriques et dérive thermique. L'amélioration notable de l'exactitude est due ici au fait que les variations de températures pendant les essais de caractérisation étaient globalement incluses dans la plage couverte pendant l'étape d'étalonnage. Pour cette étude, les défauts géométriques dans le plan des déplacements induisent une contribution, relativement à celle des dérives thermiques, plus conséquente que pour le cas unidirectionnel.

L'étude des systèmes de nanositionnement nous a tout d'abord permis de quantifier l'exactitude qu'il était possible d'en espérer. Celle-ci se situe typiquement autour du μm ce qui est tout à fait considérable en regard des résolutions affichées et des raisons pour lesquelles elles sont utilisées. Cette mauvaise exactitude peut être améliorée par compensation des défauts géométriques qui l'affectent pour environ moitié, cette proportion grandissant avec le nombre de DDL. L'autre facteur, à savoir les dérives dues aux variations de températures, est également très influent même pour des variations de températures relativement faibles, par exemple 0,5° qui constitue une variation inférieure à celle de la majorité des environnements contrôlés. Ce facteur reste néanmoins beaucoup plus compliqué à compenser, l'efficacité de sa compensation semble passer par une phase expérimentale qui doit couvrir la plage de variation de température pendant l'utilisation du système, ce qui ne peut pas facilement être maîtrisé, les variations de températures étant ici subies et imprévisibles. Pour cette raison, nous pensons que la manière la plus efficace de compenser ce paramètre très influent serait d'intégrer un moyen de détection permettant d'effectuer, de temps en temps, une prise de référence, ce point reste cependant, à l'heure actuelle, encore tout à fait ouvert surtout pour les systèmes multi-DDL.

Ces travaux relatifs à l'étude des systèmes de nanositionnement ont été partiellement effectués dans le cadre de la thèse de N. TAN et ont conduit à un article dans la revue Micromachines J22 et à l'article de conférence C32.

4.6/ CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les travaux présentés dans ce chapitre ont permis de quantifier l'exactitude des systèmes de micro et nanositionnement. Ils ont également permis d'améliorer la connaissance de leur comportement en déterminant les facteurs les plus influents et en quantifiant l'influence de chacun sur l'exactitude globale. Cette connaissance a également permis d'améliorer de manière notable l'exactitude des deux familles technologiques. Cette amélioration repose de manière notable sur l'exploitation de principes de mesures nouveaux capables de mesurer selon plusieurs directions de l'espace et avec de très grands rapports plage/résolution de mesure. En ce sens, nous avons pu mettre en œuvre un principe de mesure par mires pseudo-périodique très performant.

Il serait très intéressant de poursuivre ces travaux pour affiner la compréhension du comportement des systèmes de micro et nanositionnement et de quantifier l'influence de paramètres d'importance moindre. Cela permettrait potentiellement d'améliorer encore l'exactitude ou minimiser les dimensions des porteurs robotiques pour un niveau d'exactitude donné. Ce type de travaux repose toutefois pleinement sur l'emploi de principes de mesures plus performants ainsi que des procédures expérimentales très précises. Par exemple, la mesure par mire codées a été établie pour des mesures dans le plan. Nous cherchons actuellement à exploiter ce principe pour permettre des mesures dans l'espace dans le cadre de la thèse de Valérian Guelpa qui a débuté il y a un an. Le passage au 3D induit des problématiques particulières. Par exemple, à l'échelle micrométrique, l'hypothèse de projection parallèle prédomine ce qui rend particulièrement la mesure selon la profondeur particulièrement difficile, surtout si on cherche à obtenir une très bonne résolution. D'autres questions restent complètement ouvertes comme le choix du type de motif : périodique ou non ? quelle forme ? quelle périodicité ? motif planaire ou volumique ? mesure monoculaire ou binoculaire... Les résultats attendus de ces travaux pourront directement être utilisés pour résoudre plusieurs verrous relatifs à d'autres thématiques abordées dans ce manuscrit comme par exemple :

- d'étudier de manière bien plus complète le comportement des structures micro et nanorobotiques ou de microsystemes. Cela permettra alors d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques en jeu, d'affiner les modèles multi-physiques et donc d'améliorer la commande de ces systèmes ;
- de généraliser l'approche par commande en boucle fermée, que ce soit pour la commande de la position de doigts de micropince, de microsystemes, de microrobots, d'un composant pendant son assemblage... ;
- d'assurer un référencement relatif et absolu de nombreux composants les uns par rapport aux autres.

Les travaux relatifs aux systèmes de nanositionnement ont permis de comprendre que leur exactitude peut être potentiellement très décevante notamment dans un environnement où la température varie. Ces résultats montrent tout l'intérêt de travaux de conception, de fabrication, de modélisation ou de commande des matériaux actifs ou des structures déformables les intégrant.

ÉTUDE DE NOUVEAUX MODES D'ACTIONNEMENT ET PROPOSITION DE NOUVEAUX SYSTÈMES MICROROBOTIQUES

Le chapitre 3 a établi le besoin de nouvelles solutions technologiques intégrées et extrêmement performantes capables d'agir ou de mesurer au plus près des composants à manipuler. Pour permettre une telle intégration, nous présentons dans ce chapitre deux nouveaux modes d'actionnement : le premier est fondé sur des multi-couches piézoélectriques à film épais, le second exploite le PMN-PT (matériau piézoélectrique encore mal connu). Ces actionneurs ont conduit à la réalisation de démonstrateurs (micropince 6DDL, plateformes actionnées instrumentées et micro-banc-optique actionné), dont les performances sont particulièrement accrues en regard de l'état de l'art, que ce soit en termes d'amplitude des déplacements, de nombre de DDL et de bande passante pour un volume donné. Dans un second temps, un capteur de force piézorésistif est développé. Ses caractéristiques (rapport plage de mesure/résolution et bande passante très élevés pour un volume très faible) permettent de le positionner de manière très originale en regard de la littérature. L'intégration de ce capteur dans une micropince piézoélectrique à quatre degrés de liberté conduit à un préhenseur particulièrement dextre et sensible. Le chapitre 6 nous montrera que ce préhenseur constitue un avantage décisif pour la réalisation de tâches de micro-assemblage complexes et automatisées.

5.1/ INTRODUCTION

Les systèmes miniatures deviennent incroyablement communs et s'immiscent dans notre vie quotidienne. Les enjeux associés à ces systèmes sont considérables et visent à les rendre encore plus petits, plus intelligents, plus performants, plus personnalisés et à ce qu'ils intègrent de plus en plus de fonctionnalités. Nous pouvons citer des exemples de systèmes endoscopiques OCT [Aljasem et al., 2008], de systèmes de récupération d'énergie [Janphuang et al., 2014], de micro-assemblage [Agnus et al., 2013], de caractérisation de composants (biologiques ou artificiels) [Lafitte, 2012, Athanasiou and Bellouard, 2015], de routeurs optiques ou de capteurs pour l'instrumentation [Noell et al., 2002, Manzardo, 2002, Melpignano et al., 2014].

Cette tendance est particulièrement soutenue par les récentes évolutions des technologies de microfabrication en salle blanche, de l'intégration de matériaux actifs ou de l'utilisation de struc-

tures compliantes. Le principal challenge porte aujourd'hui sur l'intégration de différents composants nécessaires à l'obtention de performances élevées, comme des déplacements/déformations importantes, une grande bande passante, une bonne résolution, une sobriété énergétique et des capacités sensorielles intégrées.

Dans ce contexte dynamique, le choix de l'actionneur et son intégration dans la structure fonctionnelle sont particulièrement clés. Si de très nombreux types d'actionneurs sont étudiés dans la littérature, l'exploitation de l'effet piézoélectrique a considérablement progressé compte tenu de ses nombreux avantages combinés dont les principaux sont : capacité à générer des mouvements très résolus et des forces importantes, excellente bande passante, comportement relativement reproductible et contrôlable, relative facilité de mise en œuvre et d'intégration. Malgré l'ensemble de ces avantages, l'amplitude et la diversité des mouvements réalisés par les matériaux piézoélectriques restent particulièrement limitées. Cela nous a conduit à étudier une première problématique visant à proposer de nouveaux modes d'actionnement exploitant l'effet piézoélectrique et capables de performances particulièrement accrues en regard de la littérature. Ces travaux sont présentés en section 5.2.

Dans le contexte plus particulier de la microrobotique, le besoin de systèmes intégrés, actionnés et instrumentés est également grand. Les chapitres 3 et 4 nous ont, par exemple, permis de noter l'usage répandu de porteurs robotiques à grand nombre de DDL et que cela induit un empilement des défauts et finalement une précision de positionnement décevante et insuffisante en regard de nombreux besoins. Ces chapitres ont également conduit à constater qu'une des limites de l'assemblage complexe précis et automatisé réside dans le manque de capteurs capables d'effectuer des mesures locales et adaptées (plage, résolution, encombrement, dynamique). Compte-tenu de ces différents verrous, nous avons proposé de nouveaux systèmes microrobotiques intégrés. Nous avons choisi d'étudier tout particulièrement une micropince (présentée en section 5.3) et des plateformes compliantes (présentée en section 5.4) toutes deux intégrées, actionnées, instrumentées et utiles à des fins de micro-assemblage.

5.2/ ACTIONNEURS MULTI-DDL INTÉGRÉS

Les actionneurs constituent un enjeu majeur de par les performances ou le niveau d'intégration qu'ils confèrent aux systèmes miniatures les intégrant. Cela est particulièrement vrai pour les systèmes microrobotiques ou micromécatroniques qui nous intéressent plus particulièrement. Les matériaux piézoélectriques sont largement utilisés pour leurs capacités à générer des déplacements très résolus, à haute dynamique, à appliquer des forces conséquentes et leur volume relativement faible. Malgré l'ensemble de ces avantages, les matériaux piézoélectriques possèdent plusieurs limites : ils génèrent des déplacements relativement faibles, leur microfabrication est relativement complexe et limite la diversité des structures réalisables, leur comportement est très non-linéaire et leur usage est réservé à certaines échelles dimensionnelles... De nombreuses études sont actuellement conduites pour étudier ces limites et proposer des solutions pour les repousser.

Une analyse de l'état de l'art nous a montré, que de très nombreux facteurs jouent sur les performances des actionneurs piézoélectriques. Cependant, nous avons pu en identifier deux qui nous semblaient pouvoir conduire à de nouveaux modes d'actionnement de performances particulièrement accrues en regard de la littérature :

- le premier facteur est relatif au choix du matériau lui même : nous avons identifié le PMN-PT comme matériau relativement récent, mal connu mais semblant posséder de très grands

coefficients de couplage électro-mécanique. Ce potentiel unique nous a séduit et nous avons alors souhaité l'étudier (voir section 5.2.1) ;

- le second facteur est relatif aux technologies de microfabrication, leur utilisation pour des matériaux piézoélectriques est encore émergente et se limite à deux familles technologiques : les films fins et les matériaux massifs. Nous avons souhaité étudier l'espace conséquent entre ces deux approches se caractérisant par des épaisseurs de films piézoélectriques comprises entre 5 et 150 μm . Cette approche dite à film épais est étudiée en section 5.2.2.

Pour ces deux études, nous nous sommes tout particulièrement concentrés sur des structures génériques et massivement utilisées. Pour cela, nous avons étudié des structures de type poutre constituées d'une ou deux couches de matériau piézoélectrique respectivement appelées uni-morphes et bimorphes.

5.2.1/ ÉTUDE DU PMN-PT

5.2.1.1/ POSITIONNEMENT DES TRAVAUX : SPÉCIFICITÉS ET POTENTIEL DU PMN-PT

Le graphique 5.1 présente les principales évolutions des matériaux piézoélectriques et montre les progrès réalisés. Les évolutions les plus conséquentes sont l'apparition des céramiques PZT (Lead Zirconium Titanate) en 1950 qui possède des propriétés bien supérieures aux autres matériaux utilisés jusque là mais également une température de Curie élevée¹. Depuis, de nombreux autres matériaux ont été étudiés, parmi eux, le PMN (Lead Magnesium Niobate) qui fait partie de la famille des relaxors (matériaux ferroélectriques capables de générer des déformations très importantes lors de l'application d'un champ électrique). Ce matériau découvert en 1980 a fait l'objet de travaux intensifs à partir des années 90 et peut être dopé avec du PT (Lead Titane) afin de réaliser des structures solides. Le PMN-PT est devenu depuis les années 2000 un matériau possédant des propriétés remarquables et uniques. Il possède de très grandes constantes diélectriques et sa structure est monocristalline, contrairement à de nombreux autres matériaux piézoélectriques (comme le PZT), qui induit une meilleure organisation cristalline [Shen et al., 2014, Kim et al., 2010].

Malgré les études déjà menées, le PMN-PT est aujourd'hui un matériau encore mal connu. De très nombreuses études sont notamment en cours et portent sur les procédés de réalisation [Luo et al., 2009, Miyagawa et al., 2013, Kania et al., 2006, Xu et al., 2001], la proportion relative entre PMN et de PT [Shen et al., 2014, Kim et al., 2010, Cao et al., 2004], la famille cristalline induisant les meilleures performances [Hackenberger et al., 2008, Davis et al., 2006, Zhao et al., 2003, Guo et al., 2002]...

Ainsi, compte-tenu des besoins importants de matériaux actifs plus performants (voir Chapitre 3) et du potentiel du PMN-PT, nous avons souhaité étudier ce matériau et établir son potentiel pour les domaines tels que la micromécatronique et le micro-assemblage. Pour cela, nous avons pu obtenir le financement de la thèse d'Adrian Cuibotariu, thèse en co-tutelle avec l'université de Valahia en Roumanie qui a pu apporter des compétences dans le domaine des matériaux piézoélectriques et leur mise en œuvre. Cette thèse a dressé un panel des différentes spécificités de ce matériau et de déterminer les paramètres clés intéressants pour nos applications. Elle a également permis d'identifier deux directions cristallographiques particulièrement intéressantes dont l'étude sera présentée lors des deux sections suivantes :

- la direction [011] que nous avons étudiée à travers la réalisation d'actionneurs multi-DDL de

1. Température à laquelle le matériau perd ses propriétés piézoélectriques.

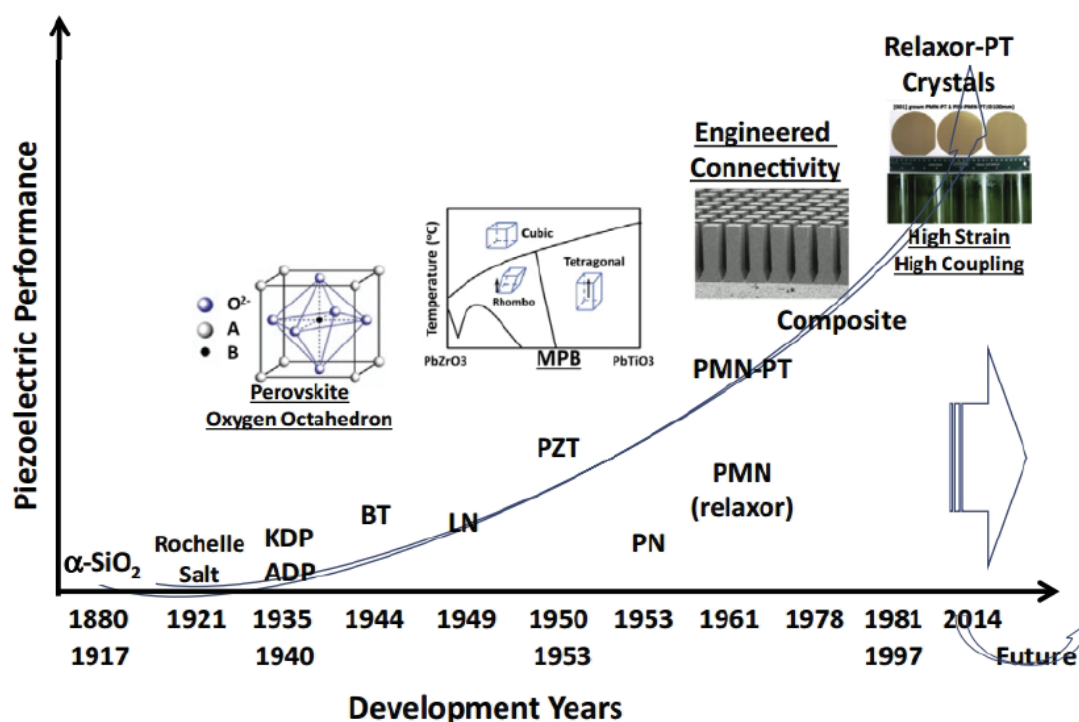


FIGURE 5.1 – Évolution des développements de matériaux piézoélectriques [Zhang et al., 2015].

type poutre. Ce type d'actionneur peut typiquement être intégré au sein de MEMS ou utilisé comme doigt de micropince et répond à ce titre aux objectifs du projet Roumain ADMAN² qui co-finance la moitié de la thèse d'Adrian Cuibotariu ;

- la direction [001] étudiée à travers des actionneurs compacts pouvant être intégrés dans des MOEMS pour générer des déplacements hors-plans. Ce type d'actionneur répond aux objectifs du projet Français MIOP-Microrob³ qui co-finance l'autre moitié de la thèse d'Adrian.

5.2.1.2/ ACTIONNEMENT MULTI-DDL FONDÉ SUR LE PMN-PT [011] : APPLICATION À LA RÉALISATION D'UNE MICROPINCE À 6DDL

L'étude du PMN-PT [011] a été conduite à travers une structure de type poutre duo-bimorphe choisie comme cas d'étude pour plusieurs raisons : ce type de poutre est constitué de deux épaisseurs de matériau actif et possède 5 électrodes : une électrode de masse qui constitue le plan d'interface entre les deux couches de matériau ainsi que 4 électrodes E_i . Deux de ces électrodes sont sur la face supérieure de la poutre tandis que les deux autres sont sur la face inférieure pour former une structure symétrique comme représenté sur la Figure 5.2(a). Cette structure duo-bimorphe est relativement simple à réaliser. Elle permet également de générer des déplacements ou forces dans deux directions (y et z) et ce, dans un volume restreint utile à son intégration dans des systèmes complexes. Ce type de structure est également générique

2. Acronyme de "Advanced devices for micro and nanoscale manipulation and characterization", projet national Roumain, 2011-2014 coordonné par Ion Alexandru Ivan, également co-encadrant de la thèse d'Adrian Cuibotariu).

3. Acronyme de "MOEMS microfabriqués et micro-assemblés : microscopie et horloge atomique sur puce", projet région Franche-Comté, 2011-2014.

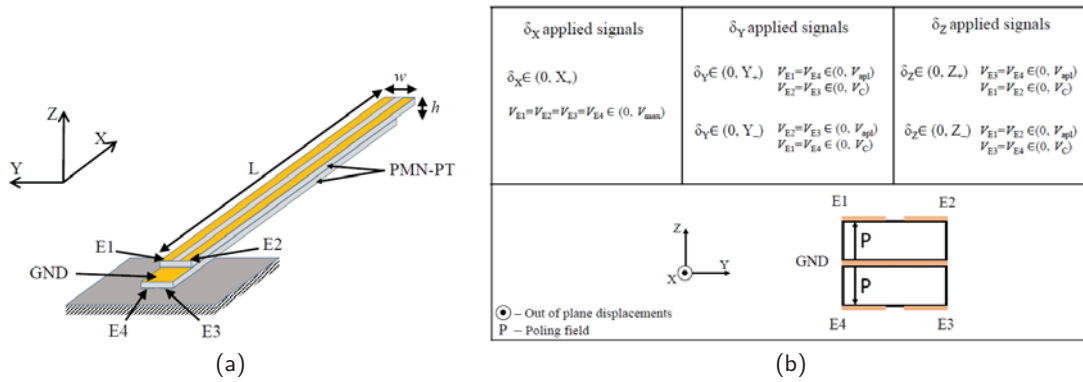


FIGURE 5.2 – Poutre duobimorphe (a) Schéma de principe : la poutre est constituée de deux couches de PMN-PT de plan de masse commun et de 4 électrodes (b) Principe d'alimentation du duobimorphe pour générer des déplacements selon x , y ou z respectivement notés δ_x , δ_y et δ_z .

et est employée dans de nombreuses applications. Aussi, de nombreux résultats sont présents dans la littérature ce qui permettra d'établir des comparaisons avec d'autres matériaux plus couramment utilisés comme le PZT.

Le PMN-PT possède plusieurs spécificités, souvent source de ses bonnes performances mais dont il est important de tenir compte pour son étude, sa modélisation ou sa mise en œuvre. En premier lieu, ses très bons coefficients piézoélectriques permettent d'envisager des déplacements selon l'axe x (direction principale de la poutre) alors que les duobimorphes réalisés dans d'autres matériaux piézoélectriques induisent des déplacements négligeables selon cette direction. Le second point à noter est le faible champ coercitif⁴ du PMN-PT [Ivan et al., 2010] : pour une épaisseur de matériau $h_p = 200 \mu m$ la tension d'alimentation limite que nous avons mesurée est de $-15 V$ pour le PMN-PT[011] alors que celle-ci est de $-150 V$ pour les PZT. La manière d'alimenter les électrodes pour générer les différents mouvements doit ainsi considérer cette spécificité, la Figure 5.2(b) détaille le principe d'alimentation utilisé. Enfin, les très grands coefficients piézoélectriques du PMN-PT conduisent à tenir compte des erreurs de fabrication ou de dissymétrie de la structure réalisée (voir Figure 5.3). Les travaux menés associés à des travaux de la littérature relatifs aux PZT [Pérez et al., 2005, de Lit et al., 2004, Ivan et al., 2010] ont conduit à établir le modèle suivant liant les déplacements δ de l'extrémité de la poutre selon les 3 directions de l'espace, les tensions appliquées à chaque électrode V_{Ei} et les forces de blocage F_b appliquées à l'extrémité de la poutre selon les 3 directions de l'espace :

$$\begin{pmatrix} \delta_X \\ \delta_Y \\ \delta_Z \end{pmatrix} = C.S.H^* \cdot \begin{pmatrix} V_{E1} \\ V_{E2} \\ V_{E3} \\ V_{E4} \end{pmatrix} + D \cdot \begin{pmatrix} F_{bx} \\ F_{by} \\ F_{bz} \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Avec la matrice C des couplages électro-mécaniques :

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix} \quad \text{où} \quad \begin{cases} C_{11} = \frac{d_{31}L}{4h_p} \\ C_{22} = \frac{3d_{31}L^2(w^2-w_0^2)}{4As_{11}w^3} \\ C_{33} = \frac{3d_{31}L^2(w-w_0)(h_p+h_g)}{4Bs_{11}w} \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} A = \frac{2h_p}{s_{11}} + E_g h_g \\ B = \frac{2h_p(2h_g^2+6h_g h_p+4h_p^2)}{s_{11}} + E_g h_g^3 \end{cases} \quad (5.2)$$

4. Champ électrique au delà duquel le PMN-PT perdra ses propriétés.

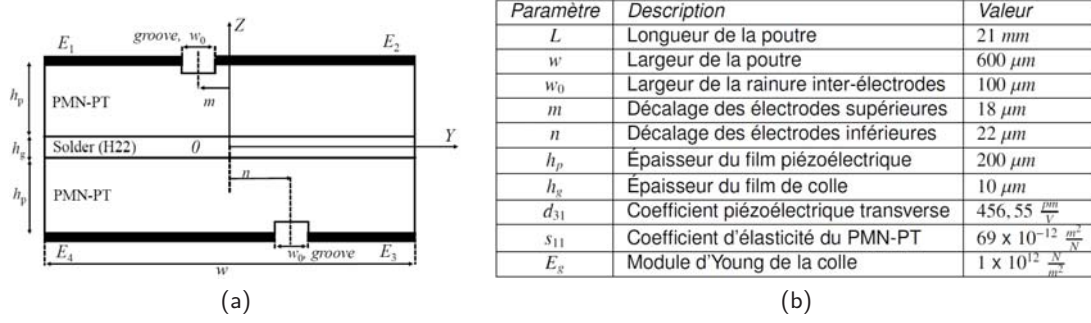


FIGURE 5.3 – Vue en coupe d'un unimorphe et paramètres associés.

Avec la matrice S permettant d'établir la contribution de la tension appliquée sur chaque électrode aux mouvements selon les directions x , y ou z :

$$S = \begin{pmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ -w_1^2 & w_2^2 & w_3^2 & w_4^2 \\ -w_5 & w_6 & w_7 & w_8 \end{pmatrix} \quad \text{avec :} \quad \begin{cases} w_1^2 = w^2 - (2m - w_0)^2 \\ w_2^2 = w^2 - (2m + w_0)^2 \\ w_3^2 = w^2 - (2n - w_0)^2 \\ w_4^2 = w^2 - (2n + w_0)^2 \\ w_5 = w - (2m - w_0) \\ w_6 = w - (2m + w_0) \\ w_7 = w - (2n - w_0) \\ w_8 = w - (2n + w_0) \end{cases} \quad (5.3)$$

Avec la matrice H^* permettant d'intégrer le fonctionnement unipolaire du PMN-PT[011] (actionnement limité par le champ coercitif) :

$$H^* = \begin{pmatrix} H(V_{E1} + V_C) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H(V_{E1} + V_C) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H(V_{E1} + V_C) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H(V_{E1} + V_C) \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

où $H(x)$ une fonction de Heaviside définie par :

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (5.5)$$

Et, enfin avec la matrice

$$D = \begin{pmatrix} \frac{s_{11}L}{w^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4L}{Aw^3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{4L^3}{Bw^2} \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

Ce modèle a fait l'objet d'une validation expérimentale, la Figure 5.4 illustre les principaux résultats où l'on peut visualiser, selon les trois directions de l'espace, les déplacements mesurés, leur comparaison avec le modèle présenté ci-dessus, ainsi que la mesure des couplages selon les axes perpendiculaires à l'axe principal du mouvement. Ainsi, la structure duobimorphe étudiée,

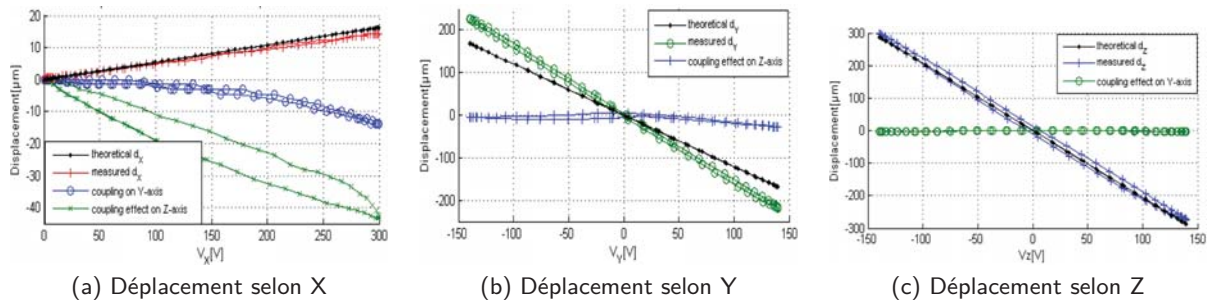


FIGURE 5.4 – Mesures expérimentales des déplacements selon les axes X, Y et Z ainsi que les couplages associés.

constituée de deux épaisseurs de PMN-PT permet d'obtenir 3 DDL (seulement deux sont possibles avec du PZT), d'atteindre de très grands déplacements (environ deux fois supérieures pour une poutre en PZT), une très faible hystérésis (trois fois plus faibles que pour un PZT) et des couplages très faibles (sauf pour les mouvements principaux selon l'axe x). Le tableau 5.1 donne les résultats ainsi obtenus.

TABLE 5.1 – Performances d'un duobimorphe en PMN-PT [011].

Plage de tension	Axe du déplacement principal	Déplacement mesuré	Hystérésis
400 V	X	41.5 μm	6.05%
400 V	Y	465 μm	4.86%
400 V	Z	653.7 μm	2.83%

La validation du modèle présenté ci-dessus a également permis de réaliser la commande du duobimorphe afin de générer des mouvements complexes dans l'espace. La commande réalisée en boucle ouverte, sans compensation des couplages et sans compensation de l'hystérésis permet de réaliser un très bon suivi de trajectoire. La Figure 5.5(a) présente le résultat obtenu pour une trajectoire circulaire dans le plan yz qui induit une erreur de moins de 4 μm .

La poutre duobimorphe étudiée a également été utilisée pour réaliser une micropince à deux doigts de serrage présentée en Figure 5.5(b). Les très bonnes performances du duobimorphe explicitées précédemment confèrent 6 DDL à cette micropince et offrent un grand espace de travail, celui-ci étant du même ordre de grandeur que pour les systèmes de nanositionnement utilisés par de nombreux scientifiques. Cette micropince a ainsi pu être montée sur un porteur robotique de micropositionnement et permet de réaliser des tâches très précises sans avoir besoin d'utiliser une système de nanositionnement (cela simplifie par ailleurs la structure du porteur et limite donc ses défauts).

Ces travaux ont montré le très bon potentiel du PMN-PT [011] pour la microrobotique et les microsystèmes. Les travaux réalisés jusqu'ici ont porté sur l'étude du comportement quasi-statique du matériau et peuvent à ce titre, faire l'objet d'investigations futures pour étudier son comportement dynamique. D'autres perspectives sont également particulièrement intéressantes comme l'exploitation des très grandes déformations pour la réalisation de microsystèmes mobiles. Nous pouvons par exemple envisager d'utiliser la micropince à 6 DDL pour réaliser des tâches de préhension dextre (réaliser des mouvements complexes en utilisant uniquement la micropince comme nous pouvons l'effectuer avec notre main).

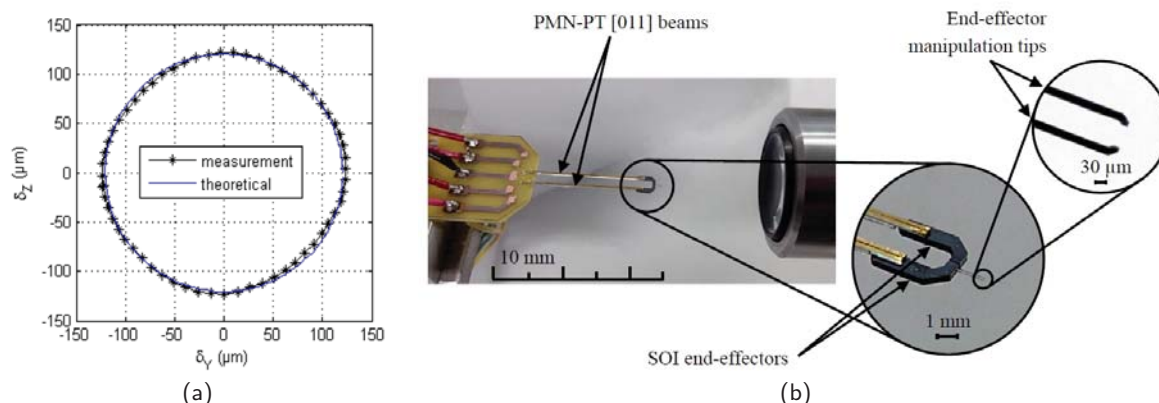


FIGURE 5.5 – (a) Trajectoire circulaire d'un doigt de micropince commandé en boucle ouverte sans compensation de couplages ou d'hystérésis (b) Micropince en PMNPT [011] possédant 6 DDL.

5.2.1.3/ ACTIONNEMENT INTÉGRÉ FONDÉ SUR LE PMN-PT [001] : APPLICATION À L'INTÉGRATION D'ACTIONNEURS DANS UN MOEMS

De très nombreuses applications ou systèmes sont limités par le manque d'actionneurs adaptés ou suffisamment performants. Par exemple, de nombreux travaux récents font état de nouveaux MOEMS qui nécessitent d'intégrer simultanément des fonctions optiques, électriques et mécaniques sur un même substrat. Les contraintes d'encombrement très fortes de ce type de systèmes associées aux besoins de générer des déplacements (souvent dynamiques) font apparaître des besoins de nouveaux modes d'actionnement, ceux actuellement disponibles n'étant souvent pas adaptés (raisons dimensionnelles, performances insuffisantes...) [Weber et al., 2012b, Aljaseem et al., 2011].

Dans ce cadre général, l'étude du PMN-PT [001] a été conduite à travers des structures parallélépipédiques puisque cette orientation cristalline permet de générer des déplacements hors plan (expansion du matériau selon sa normale) très conséquents en regard des autres matériaux piézoélectriques. Ce type de structure est élémentaire et potentiellement très petite puisque le déplacement normal à sa surface de base est théoriquement indépendant de la taille de cette surface. Cela permet ainsi de réaliser des structures extrêmement compactes et relativement simples à intégrer dans des dispositifs plus complexes.

Compte tenu de ces éléments, du besoin important d'intégration d'actionneurs dans les MOEMS ainsi que des difficultés de l'effectuer, nous avons ainsi choisi d'étudier le PMN-PT [001] à travers l'intégration d'actionneur sur les composants optiques des micro-bancs optiques présentés au chapitre 3 (section 3.2). L'actionneur étudié a pour but de réaliser des déplacements hors-plan pour déplacer la surface plane d'un micro-miroir et induit un cahier des charges relativement générique à de nombreuses applications :

- l'actionneur doit avoir des dimensions inférieures à $800 \times 800 \times 400 \mu\text{m} \times \mu\text{m} \times \mu\text{m}$ pour pouvoir être intégré sur un composant optique ;
- l'alimentation électrique de l'actionneur doit être possible ;
- les déplacements induits par l'actionneur doivent être supérieurs à une demi-longueur d'onde, nous retenons une valeur de $350 \mu\text{m}$, ordre de grandeur typique pour des applications de type interféromètre ;
- les déplacements ne doivent pas induire une déformation de la surface (miroir) supérieure au

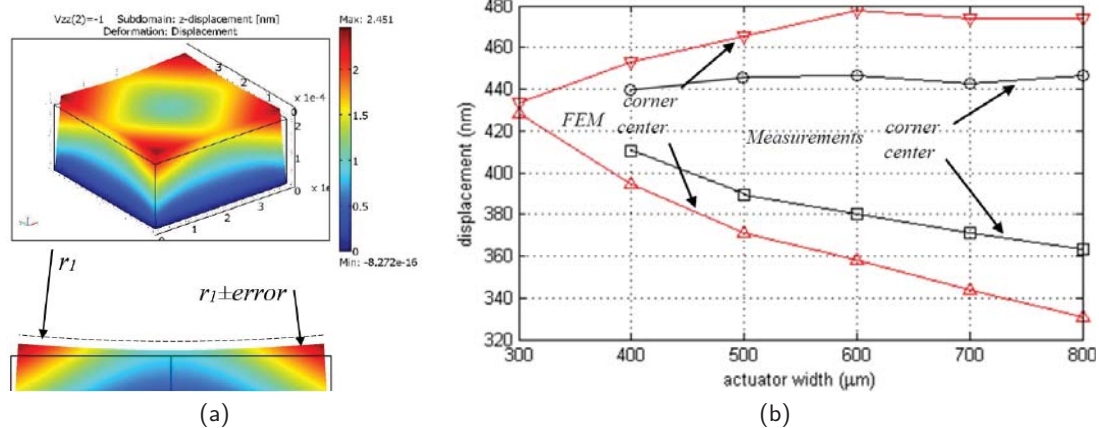


FIGURE 5.6 – Étude du comportement d'un actionneur prismatique PMN-PT [001] collé sur un substrat : (a) Image CAO montrant la déformée de la surface lors de l'alimentation de l'actionneur (b) Comparaison modèle-mesure des déplacements et déformées pour différentes tailles d'actionneurs.

vingtième du déplacement généré soit environ $35 \mu\text{m}$ (pour limiter les aberrations optiques) ;
 – un actionneur possédant une première fréquence de résonance supérieure à plusieurs centaines de Hz constituerait un intérêt supplémentaire.

L'étude a conduit à quantifier les déplacements et déformations obtenues par un actionneur prismatique collé sur un substrat comme cela est visible sur la Figure 5.6(a). Les différents facteurs influençant le comportement ont également été identifiés. Les principaux sont la technique de collage utilisée, la forme des surfaces latérales ainsi que la structure de la surface de contact entre l'actionneur et le substrat sur lequel il est collé (la surface n'étant pas forcément plane). Un modèle a permis de comprendre l'influence relative de ces différents paramètres et a pu aboutir à une validation expérimentale (Figure 5.6(b)). Un actionneur a ainsi pu être intégré à un composant optique (Figure 5.7) et fait actuellement objet d'une étude statique et dynamique, les résultats préliminaires montrent que le cahier des charges fixé est tout à fait réalisable.

5.2.1.4/ CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le besoin d'actionneurs intégrés, multi-DDL et possédant des performances accrues en regard de la littérature nous ont conduit à étudier un matériau piézoélectrique récemment apparu : le PMN-PT. Deux orientations cristallographiques ont particulièrement été étudiées à travers deux applications génériques. Les travaux effectués ont permis d'établir le modèle physique des systèmes étudiés et de montrer le potentiel de ce matériau à travers la quantification des performances qu'il induit (plusieurs fois supérieures au PZT pour plusieurs critères).

Le savoir-faire résultant de ces études peut être exploité pour étudier de manière plus approfondie ses caractéristiques notamment dynamiques mais également des procédés de réalisation en salle blanche afin de réaliser des formes plus complexes. Des applications pouvant tirer avantage de ces très grandes déformations pourraient également être étudiées spécifiquement comme la réalisation d'un préhenseur dextre ou de micro-bancs optiques actionnés. Au delà de ces perspectives relativement directes, je souhaite également noter que le PMN-PT possède des propriétés optiques intéressantes, notamment parce qu'elles peuvent être commandées

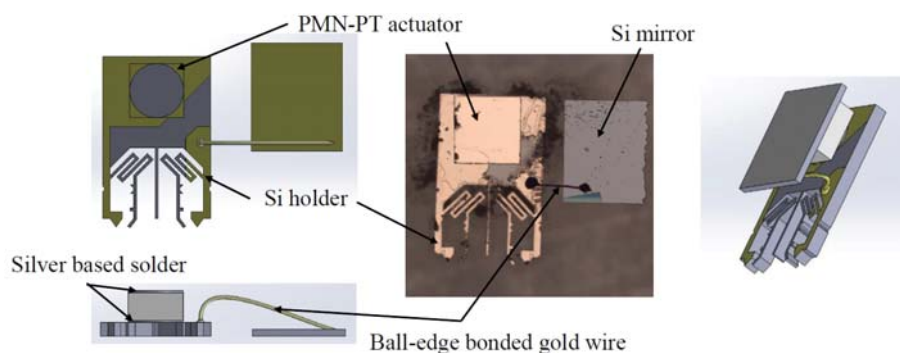


FIGURE 5.7 – Intégration d'un actionneur PMN-PT [001] sur un composant optique d'un micro-banc optique.

à travers le champ électrique appliqué au matériau. L'exploitation simultanée des couplages électro-mécaniques et électro-optique est donc possible avec ce matériau ce qui lui confère un intérêt très particulier méritant une attention spécifique.

L'étude du PMN-PT a été réalisée dans le cadre des travaux de thèse d'Adrian Cuibotariu (co-tutelle entre l'Université de Franche-Comté et l'Université de Valahia en Roumanie). Un article est actuellement soumis en revue internationale (Modélisation et commande de la micropince 6 DDL) tandis que les premiers résultats ont été publiés en conférences internationales : articles C40 et C42 (étude du PMN-PT [001]) et C33 (étude du PMN-PT [011]).

5.2.2/ ÉTUDE DE MULTI-COUCHES PIÉZOÉLECTRIQUES À FILM ÉPAIS

5.2.2.1/ POSITIONNEMENT DES TRAVAUX

L'usage des matériaux piézoélectriques ne cesse de s'accroître en raison de plusieurs facteurs comme les évolutions récentes considérables des technologies permettant leur mise en œuvre. Cependant, certains verrous majeurs demeurent et limitent particulièrement leur usage notamment pour certaines échelles dimensionnelles. En effet, les matériaux piézoélectriques peuvent être classés en deux familles technologiques principales [Kanno et al., 2003] : les systèmes fondés sur des matériaux "massifs" et ceux fondés sur des matériaux piézoélectriques à "film fin".

Les matériaux dits "massifs" sont facilement disponibles commercialement pour des prix relativement bas. Les procédés permettant de les synthétiser sont bien maîtrisés et conduisent à des matériaux possédant des coefficients de couplages importants. Leur mise en œuvre est généralement réalisée par des procédés de fabrication simples comme la découpe à la scie. Pour ces différents aspects positifs, les matériaux piézoélectriques massifs sont largement répandus et utilisés dans de nombreuses applications [Binnig et al., 1986, Jaffe, 2012, Uchino, 2010]. Ils se présentent sous forme de plaquettes dont l'épaisseur est typiquement supérieure à 150 μm . Cette limite s'impose pour des raisons de tenue mécanique liées au facteur de forme et engendre des actionneurs de grande raideur et donc capables de générer des déplacements assez faibles mais avec une bonne dynamique. Cette épaisseur importante induit plusieurs conséquences :

- des choix de conception conduisant à des longueurs d'actionneurs importantes, typiquement centimétriques, nécessaires à l'obtention de déformations suffisantes et qui se traduisent par un encombrement conséquent ;
- la génération de tensions d'alimentation importantes, souvent supérieures à 150 V, né-

cessaires à l'obtention d'un champ électrique suffisant pour engendrer les déplacements/déflexions souhaités.

La seconde famille technologique dite à "film fin" consiste à déposer, ou faire croître, un film de matériau piézoélectrique sur un substrat [Jagadish and Pearton, 2011, Nalwa, 2002]. Les épaisseurs de matériaux piézoélectriques obtenues sont typiquement de quelques micromètres. Cela permet d'obtenir des champs électriques importants donc des déformations conséquentes (plusieurs centaines de micromètres) pour des tensions d'alimentation faibles (généralement $< 10 \text{ V}$) et un encombrement minimaliste. Ces faibles épaisseurs induisent néanmoins des structures de raideur faible limitant leur bande passante (bien inférieure au kiloHertz) ainsi que l'intensité des efforts générés. Cette approche est ainsi utilisée pour des systèmes de dimensions généralement inférieures au millimètre [Quenzer et al., 2011, Koh et al., 2011].

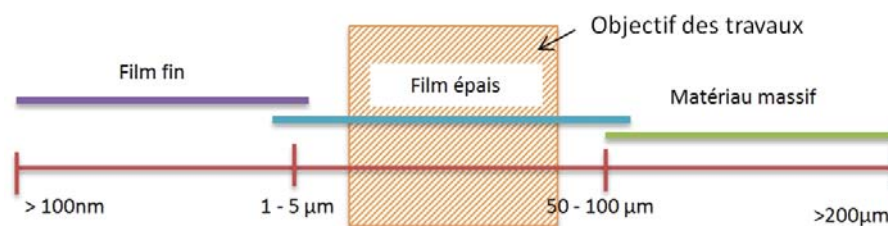


FIGURE 5.8 – Positionnement des travaux entre l'approche film fin et l'approche matériau massif.

Compte-tenu des limites de ces deux approches, les travaux menés ont pour objectif de réaliser des structures permettant d'atteindre des performances intermédiaires aux deux alternatives existantes et de tirer avantage de celles-ci (voir Figure 5.8).

Pour atteindre cet objectif, nous avons cherché à réaliser des structures dites à "film épais", c'est-à-dire dont l'épaisseur du matériau piézoélectrique sera comprise entre 5 et 150 μm et cela à l'échelle d'un wafer. L'analyse de la littérature nous a conduit à étudier l'amincissement de structures "massives" constituées d'un matériau piézoélectrique préalablement collées à un support en Silicium [Wang et al., 2010b, Xu et al., 2007]. Le collage est une étape critique dont la température est un paramètre clé. Pour une majorité des études publiées, le collage est effectué à une température supérieure à celle de Curie [Yi-Gui et al., 2011, Wilson et al., 2009]. Quelques études le réalisent en revanche à une température inférieure, mais qui reste toutefois supérieure à 110 $^{\circ}\text{C}$ [Wang et al., 2009, Aktakka et al., 2013]. Nous avons souhaité étudier une approche originale l'effectuant à température ambiante pour deux raisons fondamentales : limiter considérablement les contraintes mécaniques résiduelles et tirer avantage des bonnes propriétés naturelles des structures "massives" (les autres approches exploitent des cycles thermiques, pendant le collage, induisant des déformations importantes et non souhaitées du dispositif final, ainsi qu'une étape de repolarisation [Freund and Suresh, 2004]).

5.2.2.2/ PROCÉDÉ DE MICROFABRICATION

Nous avons choisi de réaliser des structures de type unimorphe (matériaux piézoélectrique collé sur un support en Silicium dans le cas présent) pour différentes raisons : généralité, utilisation répandue et donc possibilité de comparer les résultats obtenus avec d'autres études. Pour réaliser ces unimorphes, nous disposons initialement d'un wafer en Silicium SOI (Silicon On Insulator) et d'une plaquette de matériau piézoélectrique PZT-5H (65 mm de côté et 160 μm d'épaisseur). Les étapes du processus de microfabrication sont présentées Fig. 5.9. L'étape la

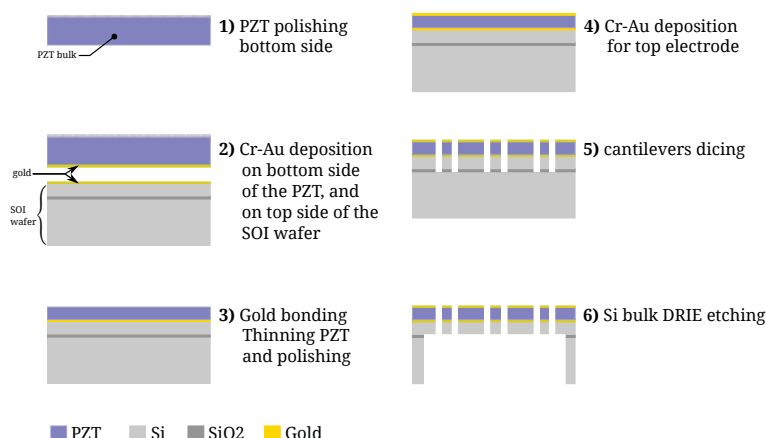


FIGURE 5.9 – Etapes de réalisation d'unimorphes piézoélectrique amincis.

plus critique consiste à coller le PZT sur le wafer en Silicium (étape 3). Cette étape nécessite en premier lieu de polir une face du PZT (étape 1). Un film Chrome-Or de $300\ \mu\text{m}$ d'épaisseur est ensuite déposé sur les deux surfaces à coller (la surface polie du PZT et celle du Silicium) comme illustré par l'étape 2. Le collage s'effectue par mise en contact de ces deux surfaces à effectuer très rapidement après dépôt du film Chrome-Or. Une pression mécanique est ensuite exercée via une presse hydraulique pendant plusieurs minutes afin de finaliser le collage. Un film unique et conducteur est ainsi obtenu permettant une solidarisation mécanique et l'application d'un potentiel électrique. Suite à cela, l'électrode supérieure est réalisée par dépôt d'un autre film Chrome-Or sur la second face du PZT (étape 4). Les différents unimorphes sont séparés par sciage (étape 5) et enfin, la couche "device" du wafer Silicium est partiellement retirée par usinage face arrière en DRIE (Deep Reactive Ion Etching) pour leur conférer leur épaisseur finale.

5.2.2.3/ ANALYSE DES PERFORMANCES

Afin de couvrir de manière suffisamment complète l'intervalle entre l'approche "massive" et "film fin" un procédé de microfabrication a été utilisé pour réaliser un ensemble d'unimorphes de caractéristiques dimensionnelles différentes. Par ailleurs, nous nous sommes intéressés à l'amplitude des déflexions générées, ainsi qu'à la fréquence de résonance pour valider l'approche proposée. Pour ce faire, deux lots de poutres ont été réalisés :

- trois poutres de $10\ \text{mm}$ de longueur et dont l'épaisseur de Silicium est de $50\ \mu\text{m}$ (voir Fig. 5.10). Celles-ci diffèrent par leur épaisseur de PZT. Elles portent l'intitulé "Long" et ont permis d'étudier leurs performances, plus proches de l'approche "massive" ;
- trois poutres de $4\ \text{mm}$ de longueur et dont l'épaisseur de Silicium est de $5\ \mu\text{m}$. Elles diffèrent par leur épaisseur de PZT. Elles portent l'intitulé "Short" et ont permis d'étudier leurs performances, plus proches de l'approche "film fin".

Les principales caractéristiques de ces poutres sont explicitées dans le Tableau 5.2. Une plateforme expérimentale a été réalisée de manière à quantifier leurs performances, d'un point de vue statique (mesure de déplacement pendant l'application d'une tension sinusoïdale de faible fréquence, typiquement $0.1\ \text{Hz}$) que dynamique. Le tableau 5.2 intègre les principales performances ainsi obtenues. Nous pouvons par exemple noter que la poutre "Short_1" ($4\ \text{mm}$ de longueur) permet d'obtenir des déplacements conséquents ($90\ \mu\text{m}$), pour des tensions faibles

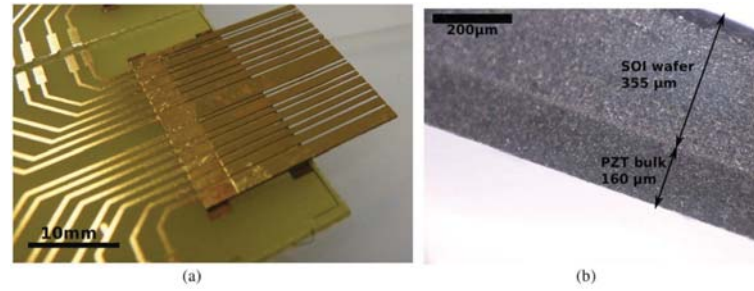


FIGURE 5.10 – Poutres unimorphes réalisées : (a) Ensemble de plusieurs poutres (b) vue latérale microscopique de l'interface PZT-Silicium.

TABLE 5.2 – Poutres unimorphes réalisées et performances obtenues expérimentalement.

Nom des poutres	<i>Long_1</i>	<i>Long_2</i>	<i>Long_3</i>	<i>Short_1</i>	<i>Short_2</i>	<i>Short_3</i>
Épaisseur de PZT h_p (μm)	40	80	160	11	26	48
Épaisseur de Si h_s (μm)	50	50	50	5	5	5
Longueur de la poutre L (mm)	10	10	10	4	4	4
Déplacement/Tension appliquée ($\mu m V^{-1}$)	7.2	2.93	1.23	18	4.8	1.25
Fréquence de résonance (Hz)	743	944	1305	535	1103	1772

(5 V) avec une dynamique correcte (Bande passante de 535 Hz). Les travaux ont également permis de vérifier que l'hystérésis est d'amplitude classique, c'est à dire typiquement de 15 % mais également que les modèles de Ballas sont applicables tant pour évaluer l'amplitude des déplacements δ que la fréquence de résonance f_r :

$$\begin{cases} \delta = \frac{-3d_{31}S_{11}^s S_{11}^p h_s(h_p+h_s)L^2}{(S_{11}^p)^2 h_s^4 + S_{11}^s S_{11}^p (4h_p h_s^3 + 6h_p^2 h_s^2 + 4h_s h_p^3) + (S_{11}^s)^2 h_p^4} \times V \\ f_r = \frac{1.8751^2 h_p}{2\pi L^2} \times \sqrt{\frac{(S_{11}^p)^2 (\frac{h_s}{h_p})^4 + S_{11}^p S_{11}^s (4(\frac{h_s}{h_p})^3 + 6(\frac{h_s}{h_p})^2 + 4\frac{h_s}{h_p}) + (S_{11}^s)^2}{12S_{11}^s S_{11}^p (S_{11}^s + S_{11}^p \frac{h_s}{h_p}) (\rho_s \frac{h_s}{h_p} + \rho_p)}} \end{cases} \quad (5.7)$$

Les différents paramètres sont définis dans le tableau 5.3, et le coefficient 1.8751 correspond à la valeur de celui relatif au premier mode de résonance. Finalement, la Figure 5.7 permet d'apprécier les performances obtenues en regard de celles habituellement rencontrées pour des structures "massive" et "film fin" en considérant deux critères principaux : le rapport amplitude du déplacement généré par unité de tension d'alimentation et la fréquence de résonance.

5.2.2.4/ CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ces travaux, réalisés sur des poutres de type unimorphe, ont des performances assez uniques en regard de l'état de l'art. Ils ont notamment permis de proposer des structures génériques et très compactes, dont les plages de déplacements et de fréquences sont étendues pour des dimensions données. Il est, par exemple, possible de réaliser des poutres de $1,2 \mu m/V$ de déplacement élémentaire et $1700 Hz$ de fréquence de résonance jusqu'à celles induisant un déplacement élémentaire de $18 \mu m/V$ pour une fréquence de résonance de $600 Hz$. A ce titre, ils ouvrent de nouvelles possibilités dans la conception et réalisation de dispositifs, en permettant par exemple, d'imaginer de nouvelles fonctionnalités ou de proposer des systèmes avec des performances accrues dans un volume donné. Nous étudions par exemple, une plateforme instrumentée (section 5.4.3) ainsi qu'une micro-nano pince dextre possédant 4 doigts

TABLE 5.3 – Liste des variables

Variable	Définition	Valeur utilisée	Unité
T_c	Température de Curie du PZT–5H	230	$^{\circ}C$
d_{31}	Coefficient piézoélectrique du PZT–5H	-320×10^{-12}	$m V^{-1}$
S_{11}^p	Souplesse du PZT–5H (à champ électrique constant)	16.13×10^{-12}	$m N^{-1}$
S_{11}^s	Souplesse du Silicium	7.68×10^{-12}	$m N^{-1}$
ρ_p	Masse volumique du PZT–5H	7800	$kg m^{-3}$
ρ_s	Masse volumique du Silicium	2329	$kg m^{-3}$
h_p	Epaisseur du film piézoélectrique	$0 < h_p < 250$	μm
h_s	Epaisseur du film passif (Silicium)	$0 < h_s < 100$	μm
L	Longueur de la poutre	$0 < L < 200(h_p + h_s)$	μm
V	Tension d'alimentation	$-100 < V < 100$	V

qui peuvent réaliser des mouvements dans le plan et hors plan. Cette pince a pour objectif de permettre la réalisation de tâches de manipulation complexes de très petits composants (typiquement des nanofils) avec la plateforme Microrobotex. Celle-ci travaille dans un environnement extrêmement contraint tant dimensionnellement qu'en terme d'environnement. En effet, cette plateforme intègre un Microscope Electronique à Balayage couplée à plusieurs outils complémentaires tels qu'un FIB (Focuss Ion Beam).

Ces travaux relatifs à l'étude et mise en œuvre d'actionneurs piézoélectriques multi-couches à film épais ont été effectués dans le cadre des post-doctorats d'Alex Bienaimé puis de Vincent Chalvet avec la collaboration active de Micky Rakotondrabe. Ils ont conduit à la publication de l'article de revue internationale J19 (réalisation et étude des performances statiques) et de la communication internationale CI9, un article étant par ailleurs actuellement soumis en revue (étude et modélisation du comportement non-linéaire).

5.3/ MICROPINCE 4DDL INTÉGRÉE ET INSTRUMENTÉE EN FORCE

5.3.1/ POSITIONNEMENT DES TRAVAUX

Les micropinces figurent parmi les systèmes miniatures les plus étudiés. Des dizaines d'entre-elles ont été présentées dans la littérature et deux synthèses sont présentées dans [Lang, 2008, Agnus et al., 2005]. Ce constat repose certainement sur le fait que ; les micropinces sont des systèmes directement au contact des objets manipulés. Les choix relatifs à leur conception, leur fabrication ou leur commande jouent un rôle direct sur la manière dont seront contrôlés ces contacts et les transitions contact/non-contact et, par conséquent, sur la réussite des tâches de micromanipulation. Cela est d'autant plus important à l'échelle micrométrique puisque plusieurs problématiques conséquentes (prédominance des forces surfaciques, dynamiques importantes, incertitudes de comportements) se concentrent sur cette interaction micropince-objet. La littérature explicite de nombreuses approches, différents principes d'actionnement et de mesures qui ont été étudiés. De même, plusieurs architectures de micropince exploitant un ou plusieurs doigt(s) actionné(s) et un ou plusieurs doigt(s) sensible(s) sont présentés [Piriyant et al., 2015, Rakotondrabe et al., 2015, Xu, 2013a, Wang et al., 2013, Wei et al., 2013, Kim et al., 2008, Duc et al., 2008, Beyeler et al., 2007, Millet et al., 2004, Zang et al., 2004, Dechev et al., 2004a, de Lit et al., 2004, Bellouard et al., 1999].

Dans notre cas, l'objectif des travaux était de réaliser une micropince capable d'effectuer des tâches de micro-assemblage complexes et précises. Différentes problématiques étaient à adresser : prise en compte des forces d'interaction, considération des aspects dynamiques, précision

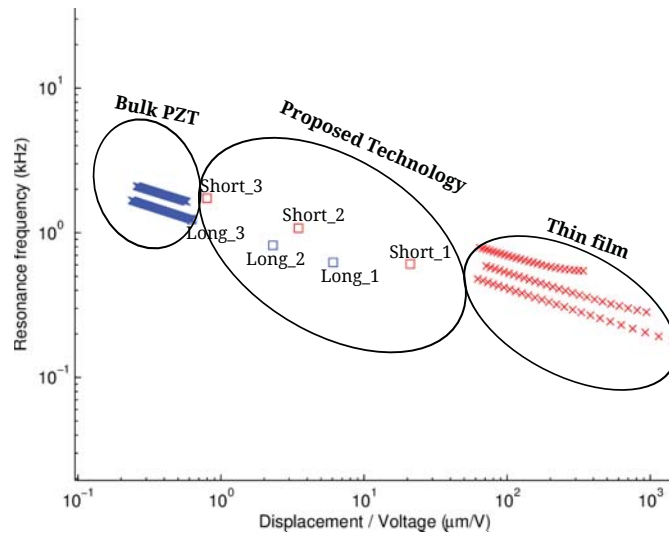


FIGURE 5.11 – Bilan des performances d'unimorphes : les carrés sont les résultats expérimentaux des unimorphes réalisés dans cette étude tandis que les croix correspondent aux résultats de simulation pour les approches "massive" et "film fin" en utilisant le modèle de Ballas (Eq. 5.7).

des mouvements, adaptabilité (différents objets, variation des paramètres d'environnement)... La Figure 5.12 présente les différents travaux de la littérature relatifs à des micropinces intégrées actionnées et instrumentées. Cette Figure indique également les performances recherchées pour la micropince, dont nous avons besoin. Les travaux effectués au chapitre 3 nous avaient conduit à définir ces performances, ainsi que le besoin d'une micropince à deux doigts actionnés (chacun intégrant un capteur de force).

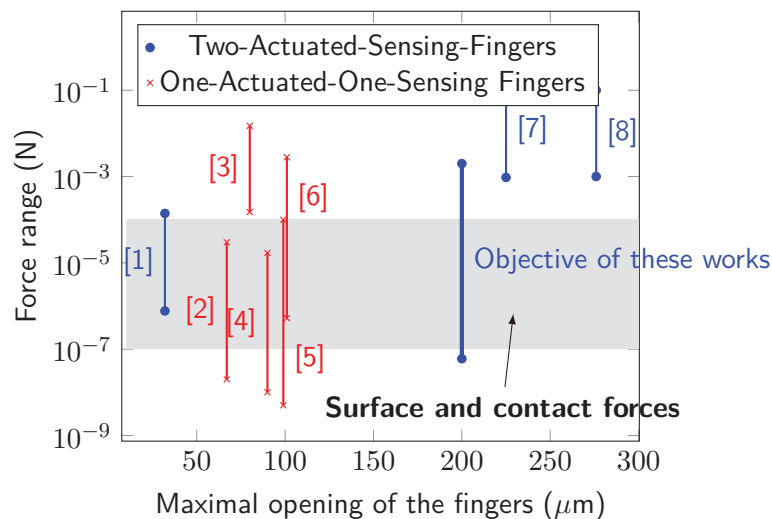


FIGURE 5.12 – Objectifs de positionnement des performances de la micropince instrumentée⁵.

5. Les nombres indiqués dans la Figure correspondent aux références suivantes : [1] = [Duc et al., 2008], [2] = [Kim et al., 2008], [3] = [Rakotondrabe and Ivan, 2011], [4] = [Piriyant et al., 2015], [5] = [FT-G Microgripper,], [6] = [Beyeler et al., 2007], [7] = [Wang et al., 2013], [8] = [Xu, 2013a].

Le manque de solution correspondant à nos besoins, nous a amené à développer notre propre micropince. En terme d'actionnement, nous avons choisi une approche exploitant les matériaux actifs garantissant une très bonne résolution de mouvements, mais également leur réversibilité. Ce dernier point est particulièrement important en terme de versatilité (préhension de composants de tailles différentes notamment) ou pour améliorer la position d'un composant qui serait insuffisamment précise. Parmi les différents types de matériaux actifs, nous avons choisi d'exploiter l'effet piézoélectrique pour ses nombreux avantages dans un contexte de micromanipulation (résolution, plage, dynamique, possibilité d'exploiter l'effet direct et indirect même simultanément). Nous avons, à ce titre, choisi l'actionneur préalablement développé au sein du département AS2M à savoir un actionneur constitué de deux doigts, chaque d'entre eux étant un duobimorphe (La Figure 3.8 du chapitre 3 rappellera cette structure)). Ce choix permet de générer des mouvements plans et hors plan d'où la dénomination de micropince à 4 Degrés de Libertés.

Outre cet actionneur, nous avons également choisi d'intégrer des capteurs de forces dans la micropince dans un souci de précision, dextérité et fragilité des composants manipulés. En effet, les forces de contact, qui apparaissent pendant un processus d'assemblage, ont des effets prépondérants, de part l'échelle considérée (nous avons montré que les forces de pull-off peuvent atteindre $200 \mu N$ pour des contacts surfaciques de $50 \times 50 \mu m \times \mu m$) et sont par ailleurs très mal connues (pas de modèle fiable pour les cas étudiés) et extrêmement erratiques. Par ailleurs, les dynamiques en jeu sont particulièrement grandes pouvant atteindre plusieurs milliers de fois l'accélération de la pesanteur lors d'un contact mal maîtrisé.

5.3.2/ DÉVELOPPEMENT D'UN CAPTEUR DE FORCE PIÉZORÉSISTIF

Mesurer les forces, en jeu à l'échelle micrométrique, constitue un enjeu important que ce soit, pour identifier des paramètres d'objets biologiques ou artificiels ou pour réussir des tâches microrobotisées en dépit de la prédominance des forces de surfaces et des aspects dynamiques. Ces spécificités conduisent à réaliser des capteurs les plus petits possibles, afin qu'ils puissent effectuer une mesure le plus proche possible de la zone d'intérêt. Cette contrainte dimensionnelle est utile pour limiter l'effet des perturbations extérieures au système, limiter les effets dus à la variation des paramètres du système et réduire les bruits de mesure [Ousaid et al., 2014, Boudaoud et al., 2011, C. Clévy and Chaillet, 2011].

L'objectif de mes travaux est de développer des capteurs capables de mesurer les forces de contact qui apparaissent pendant la manipulation d'un microcomposant (incluant les forces de pull-off notamment). Les principales caractéristiques recherchées ont permis d'établir un cahier des charges :

- plage de mesure de l'ordre du mN ;
- plus grand rapport signal sur bruit possible, typiquement supérieur à 100 ;
- dimensions les plus petites possibles (volume typiquement inférieur au mm^3 cube) de manière à pouvoir intégrer ces capteurs au plus près de l'extrémité des organes terminaux de la micropince ;
- une bande passante supérieure à $5 KHz$ (choisie comme supérieure à celle des actionneurs piézoélectriques utilisés en micromanipulation) ;
- un procédé de microfabrication simple permettant l'intégration des capteurs dans les organes terminaux de micropince eux-mêmes réalisés en utilisant des wafers Sol.

Différents principes ont été étudiés dans la littérature. Les capteurs exploitant l'effet capacitif

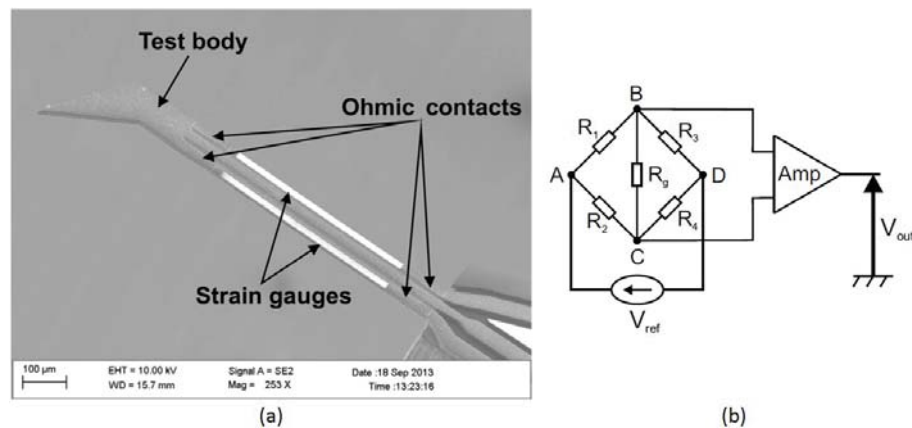


FIGURE 5.13 – Capteur de force piézorésistif (a) image MEB montrant 2 jauges (R1 et R2), les contacts ohmiques et le corps d'épreuve (b) pont de Wheastone associé.

sont les plus répandus [Muntwyler et al., 2010, Sun et al., 2002, Enikov and Nelson, 2000]. Cependant, il induit des capteurs de dimensions importantes pouvant typiquement atteindre un centimètre carré, rendant l'intégration de tels capteurs difficile. Par ailleurs, leur fabrication est relativement complexe, car elle nécessite des précautions particulières pour isoler électriquement différentes zones d'électrodes.

Une seconde famille technologique exploite la mesure de décalage de la fréquence d'une structure résonnante [Blom et al., 1989, Mullem et al., 1991]. Ce principe donne de bonnes performances, mais s'avère difficile à intégrer et les vibrations générées peuvent perturber les tâches de micromanipulation.

L'exploitation de l'effet piézorésistif constitue un dernier principe de mesure particulièrement répandu. Il est fondé sur la variation de résistance d'une petite surface placée dans ou sur une structure compliant. Ce principe de mesure conduit à des capteurs très petits, de très bonnes bandes passantes, mais dont les performances sont très diverses. Ce principe de mesure induit deux familles technologiques, celle exploitant des matériaux métalliques [Li et al., 2007, Wisitsoraat et al., 2007] et celle utilisant le Silicium [Doll and Pruitt, 2012, Molhave and Hansen, 2005]. Nous avons souhaité retenir le principe de mesure piézorésistif fondé sur des jauges en Silicium pour deux raisons principales : les organes terminaux de la micropince sont réalisés en Silicium qui est, par ailleurs, le matériau le plus répandu en microfabrication (aspect générique des travaux et procédés de microfabrication maîtrisés), le Silicium possède un excellent coefficient de jauge (facteur caractérisant la variation de la résistance électrique des jauges relativement à leur déformation, son coefficient de jauge est supérieur à 100 alors qu'il est bien souvent inférieur à 5 pour la majorité des autres matériaux).

Ce choix et le cahier des charges indiqué nous ont conduit à définir une structure puis à la réaliser. La Figure 5.13 présente un capteur de force issu de ces travaux. La structure de ce capteur intègre deux jauges de déformations (de résistances R1 et R2), qui sont disposées de part et d'autre son axe. Ces jauges sont par ailleurs séparées par de petites ouvertures longitudinales conduisant à une structure de type tri-poutre. Ces choix de conception ont permis d'optimiser le volume du capteur tout en favorisant sa sensibilité de mesure.

Le procédé de fabrication de ce capteur est relativement simple, initialement un wafer Sol est utilisé (Si 350 μm - SiO₂ 1 μm - Si 10 μm). L'épaisseur de 350 μm constituera le support rigide du capteur tandis que celle de 10 μm constituera l'épaisseur finale de la partie flexible. Les étapes principales du procédé de microfabrication sont une oxydation thermique (sauf aux

extrémités des jauges), un dépôt d'Aluminium qui permettant de réaliser les pistes électriques, mais également les contacts ohmiques (l'Aluminium est directement au contact du Silicium aux extrémités des jauges car laissées libres par l'oxydation), puis un recuit permettant la diffusion de l'Aluminium au sein du Silicium en bout de jauges (ce qui permet d'établir un contact électrique). Cette dernière est particulièrement critique et nécessite une attention particulière afin d'obtenir des résistances de contact les plus faibles possibles. Le procédé induit ensuite plusieurs étapes d'enlèvement de matière afin de donner au capteur sa forme finale (usinage face avant et arrière par RIE et D-RIE).

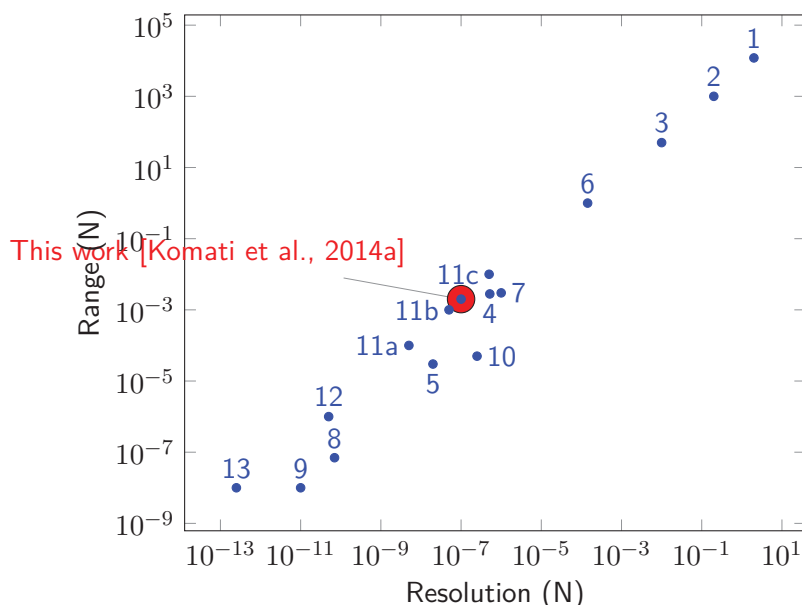


FIGURE 5.14 – Positionnement du capteur réalisé par rapport à la littérature⁶.

Les capteurs ainsi réalisés ont alors été soumis à étalonnage (masses calibrées et capteurs industriels femtotools) puis à des essais de caractérisation. Les performances obtenues sont extrêmement intéressantes par rapport aux solutions de l'état de l'art puisque la taille du capteur est de $700 \times 20 \times 12 \mu\text{m} \times \mu\text{m} \times \mu\text{m}$, sa sensibilité est de $197 \mu\text{NV}^{-1}$, la résolution de mesure est de 100 nN pour une plage de 2 mN , un rapport signal sur bruit de 50 dB , une raideur de 130 Nm^{-1} et une bande passante de $8,52 \text{ kHz}$. La Figure 5.14 permet de comparer les performances ainsi obtenues, en regard d'autres capteurs présents dans la littérature en considérant les critères de plage de mesure et de résolution. Les autres capteurs présents à proximité de celui développé ici sont généralement soit beaucoup plus gros, avec des rapports signaux sur bruit beaucoup plus défavorables ou soit moins performants pour un encombrement proche.

5.3.3/ INTÉGRATION DU CAPTEUR DANS LA MICROPINCE

L'intégration des capteurs de force précédemment présentés au sein d'une micropince revêt plusieurs enjeux de nature technologique. En premier lieu les organes terminaux (passifs) de la

6. Les références mentionnées dans la Figure correspondent aux citations suivantes : 1 = [Truck Weigh,], 2 = [Precision Force Gauge PGE-FG 1K,], 3 = [Precision Force Gauge PCE-FG 50,], 4 = [Beyeler et al., 2007], 5 = [Kim et al., 2008], 6 = [Wang et al., 2013], 7 = [Wei et al., 2013], 8 = [Park et al., 2010], 9 = [Doll and Pruitt, 2012], 10 = [Cappelleri et al., 2011], 11a = [FT-S Microforce Sensing Probe,], 11b = FemtoTools Ft-S1000, 11c = FemtoTools Ft-S10000, 12 = [Rajagopalan et al., 2010a], 13 = [Simson et al., 1998a].

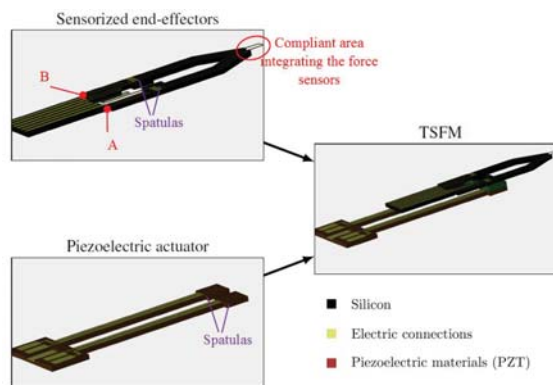


FIGURE 5.15 – Schéma de principe de l'intégration.

micropince comprenant les capteurs de force doivent être intégrés mécaniquement au reste de la micropince. Celle-ci possède deux organes terminaux, la maîtrise de leur position relative finale est donc un premier point clé. Par ailleurs, l'intégration induit également des contraintes fortes en terme de connexions électriques. En effet, 11 connexions électriques sont nécessaires (5 pour l'actionneur et 6 autres pour les capteurs) or les connecteurs et les fils ont des dimensions du même ordre de grandeur que la micropince elle-même. Ces différentes problématiques ont conduit à réaliser une structure en Silicium comprenant les deux organes terminaux de la micropince (voir Figure 5.15). Cette structure est ensuite collée sur l'actionneur formant un ensemble nommé TSFM selon l'acronyme Anglais de micropince à deux doigts instrumentés intégrant la mesure de force. Cette ensemble est ensuite inséré dans un boîtier de protection et des connecteurs électriques sont ajoutés conduisant à la micropince présentée Figure 5.16.

La micropince 4 DDL intégrée et instrumentée en force présentée dans cette section a été développée dans le cadre de la thèse de Bilal Komati qui a bénéficié des travaux de Joël Agnus (Ingénieur de recherche). Des travaux préliminaires ont été publiés dans C39 et la pince complète associée à son modèle dynamique sont actuellement soumis dans la revue T-Mech. Cette micropince a été intégrée au sein d'une plateforme de micro-assemblage et son modèle dynamique associé à une commande hybride force-position a permis de réaliser des micro-assemblages automatisés. Ces différents travaux sont présentés au chapitre 6. Par ailleurs, le capteur de force présenté dans cette section a été publié dans J15 et fait actuellement objet d'une pré-maturation (présentée en section 7.2.3 du chapitre 7) en vue de la création d'une entreprise.

5.4/ PLATEFORMES ACTIONNÉES ET INSTRUMENTÉES

Lors de tâches de micromanipulation, il est aussi possible de déplacer un composant ou de mesurer les forces de contact en intégrant actionneurs et capteurs dans le plan de travail (où les composants manipulés sont disposés). Cette alternative est pertinente compte-tenu du besoin extrême et difficultés d'intégrer des actionneurs et capteurs au plus près de l'objet manipulé. Ce type de système a été assez peu étudié dans la littérature. Les systèmes présentés couvrent, pour la grande majorité, des plages d'actionnement et de mesure éloignées de celles pertinentes au contexte de la micromanipulation robotisée [Li and Xu, 2009, Clévy et al., 2008, Popa and Stephanou, 2004, Choi et al., 2001]. Les travaux présentés ici visent à proposer des systèmes compliant multi-DDL, intégrant actionnement et mesure selon une autre alternative que celle étudiée dans la section précédente (proposition d'une micropince instrumentée).

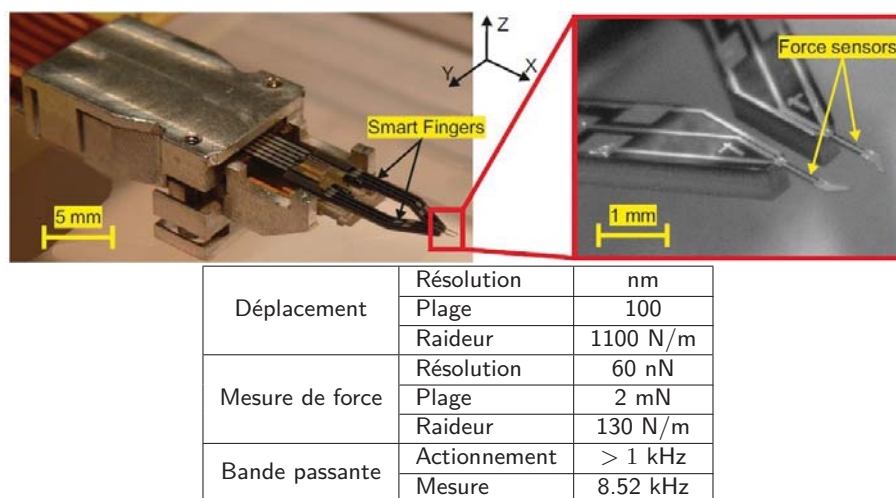


FIGURE 5.16 – Micropinçe piézoélectrique à 4 Degrés de Liberté intégrant deux capteurs de force piézorésistifs (photographies et tableau de performances)

Ces travaux ont été réalisés en trois étapes principales détaillées ci-après. Nous avons tout d'abord réalisé une plateforme instrumentée c'est-à-dire de structure compliant intégrant un capteur de force commercial et mettant en œuvre un observateur à entrée inconnue. Une seconde étape nous a conduit à remplacer le principe de mesure de force commercial par une estimation de déplacement par intégration de mires codées. La troisième étape, en cours, consiste à proposer une plateforme actionnée et instrumentée multi-DDL particulièrement compacte et intégrant une mesure haute résolution.

5.4.1/ PLATEFORME INSTRUMENTÉE ET OBSERVATION D'ENTRÉE INCONNUE

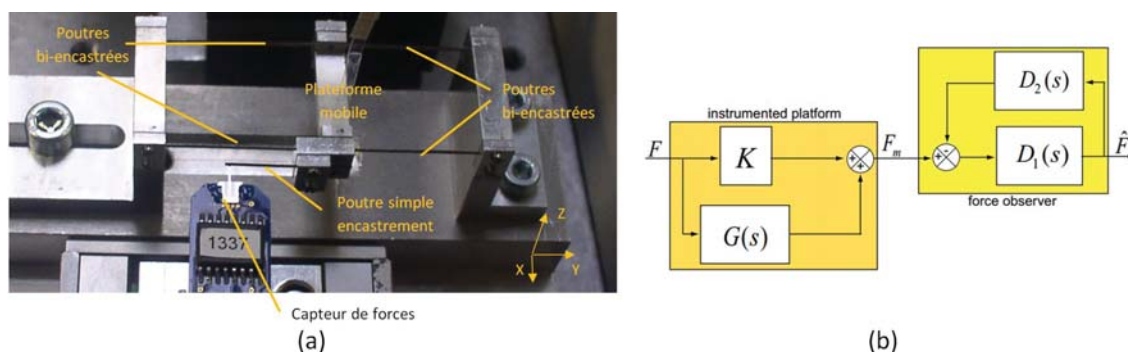


FIGURE 5.17 – Support instrumenté constitué d'une plateforme mobile et d'un capteur de forces : (a) système expérimental (b) observateur à entrée inconnue.

Le peu de travaux présents dans la littérature et la complexité potentielle de la réalisation de plateformes instrumentées nous ont conduit, à mener une première étude fondée sur un système expérimental simple et générique (voir Figure 5.17(a)). Pour cela, nous avons réalisé un support instrumenté, dont la plateforme est suspendue à 4 poutres flexibles bi-encastées permettant son mouvement selon l'axe X. Ce mouvement est typiquement généré par l'application d'une force extérieure (pendant la manipulation d'un composant déposé sur celle-ci par exemple) que nous cherchons à quantifier. Pour cela, un capteur de force commercial (société Femtotoools,

Suisse) est intégré permettant, via une poutre à encastrement simple utilisée comme bras de levier, d'estimer cette force extérieure appliquée à la plateforme mobile.

La force extérieure exercée sur la plateforme F est inconnue, et est approximée via un observateur à entrée inconnue, exploitant la mesure de force F_m , issue du capteur commercial, et le modèle de comportement dynamique de la plateforme. Ce modèle d'entrée F et de sortie F_m est décomposé en son gain K et sa dynamique $D(s)$. L'observateur réalisé (voir Figure 5.17(b)) a pour objectif d'obtenir une observation \hat{F} la plus fidèle possible de F tant statiquement que dynamiquement. Cela est possible sans réaliser d'inversion de fonction de transfert (n'induisant donc pas de condition de bi-causalité ou de bi-stabilité en fixant les transferts suivants :

$$\begin{cases} D_1(s) = \frac{1}{K} \\ D_2(s) = G(s) \end{cases} \quad (5.8)$$

Une réponse indicielle expérimentale et une analyse par méthode ARMAX ont conduit à l'identification de K et $G(s)$ sous forme d'une fonction de transfert d'ordre 4 (voir méthodologie détaillée dans [Rakotondrabe et al., 2010]). D'autres essais expérimentaux ont permis de valider la plage de mesure (10 mN), l'exactitude (inférieure à $45 \mu\text{N}$) et la réponse dynamique. Ces très bonnes performances valident l'intérêt d'une approche par support instrumenté, puisque les performances atteintes sont du même ordre que pour des capteurs extéroceptifs qui, faute de place, ne pourraient pas être intégrés pour réaliser des tâches de microassemblage.

5.4.2/ PLATEFORME INSTRUMENTÉE À GRAND RAPPORT PLAGE-RÉSOLUTION

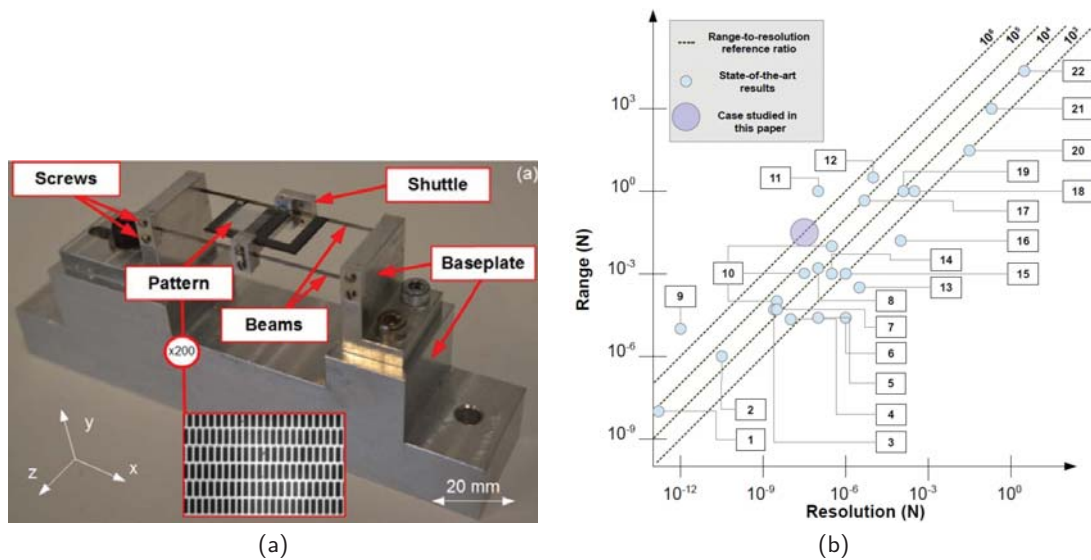


FIGURE 5.18 – Plateforme instrumentée à grand rapport plage/résolution de mesure intégrant un vernier : (a) la plateforme développée (b) positionnement des travaux par rapport à la littérature⁷.

Les travaux préliminaires explicités dans la section précédente ont permis de constater, que les performances du principe de mesure (utile à l'observation) et la conception de la structure compliant sont les deux points les plus influents sur les performances finales. Dans la littérature, la majorité des travaux étudient la conception mécanique de la structure compliant

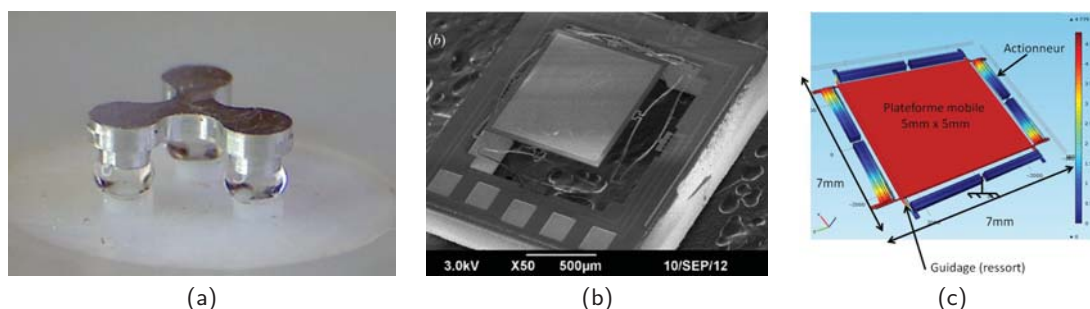


FIGURE 5.19 – Plateformes étudiées : (a) plateforme de structure parallèle actionnée par 3 gouttes d'eau (diamètre des gouttes inférieur à 1 mm) (b) Micromiroir de structure parallèle actionné par 4 actionneurs électrothermiques (surface mobile : 1 mm²) (c) Plateforme actionnée instrumentée intégrant 8 poutres de type duobimorphe en matériau piézoélectrique aminci et une mire codée (surface mobile de 5x5 mmxmm).

en cherchant à l'optimiser et en la combinant avec des principes de mesures commerciaux. Les plateformes instrumentées et présentées dans la littérature possèdent des rapports plage de mesure/résolution généralement compris entre 10^3 and 10^5 (le plus souvent proche de 10^3 pour les travaux portant sur l'échelle micrométrique). Nous avons effectué le choix inverse en conservant la structure basique et générique présentée Figure 5.17, mais en remplaçant le capteur de force par une mesure de déplacement à grand rapport plage/résolution de mesure (voir section 4.3). Ce principe exploite la vision et une double mire à pas répétitifs permettant une résolution de mesure de l'ordre du millième de pixel. Les périodes des deux mires sont très proches afin d'exploiter, en complément, le principe du Vernier. La Figure 5.18(a) présente, le système réalisé intégrant la double mire Vernier. Les performances finales du système obtenues expérimentalement sont une plage de mesure de 50 mN, une résolution inférieure à 50 nN (d'où un rapport plage/résolution de mesure de 10^6) et une répétabilité de 7,8 µNm permettant de positionner les travaux de manière tout à fait originale en regard de la littérature (voir Figure 5.18(b)), ici en utilisant des critères plage et résolution de mesure obtenus dans [Guelpa et al., 2015].

5.4.3/ PLATEFORME ACTIONNÉE INSTRUMENTÉE HAUTEMENT INTÉGRÉE

Compte-tenu du peu de travaux présents dans la littérature et du manque de moyens techniques disponibles commercialement, nous avons choisi d'étudier, plusieurs principes d'actionnement originaux. Dans un premier temps, grâce à une collaboration avec l'équipe de Pierre Lambert (Université Libre de Bruxelles), nous nous sommes intéressés à exploiter les forces capillaires. Nous avons ainsi pu étudier une plateforme miniature actionnée par 3 gouttes d'eau déformables proposée par Cyrille Lenders (Figure 5.19(a)) [Lenders et al., 2012]. Ces travaux [Majcherczyk et al., 2014] ne sont pas détaillés ici mais font l'objet d'études encore en cours pour améliorer le système actuel (choix d'un fluide limitant les effets de l'évaporation et conception d'un principe de mesure). Nous avons également étudié un autre type de

7. Les références mentionnées dans la Figure correspondent aux citations suivantes : 1 = [Simson et al., 1998b], 2 = [Rajagopalan et al., 2010b], 3 = [Abadie et al., 2012], 4 = [Y. Sun, 2005], 5 = [Zea et al., 2012], 6 = [Greminger and Nelson, 2004], 7 = [Cullinan et al., 2012], 8 = [Komati et al., 2014a], 9 = [Nesterov, 2007], 10 = [FemtoTools,], 11 = [CSM,], 12 = [Kern,], 13 = [Chen et al., 2009], 14 = [Y. Sun, 2003], 15 = [Beyeler et al., 2009], 16 = [Estevez et al., 2011], 17 = [Wood et al., 2009], 18 = [Berkelman et al., 2003], 19 = [Kristiansen et al., 2008], 20 = [PCE Inst., b], 21 = [PCE Inst., a], 22 = [Timber,].

structure, cette fois-ci, actionnée par principe électrothermique (Figure 5.19(b)). Ces travaux [Espinosa et al., 2014] ne sont également pas détaillés ici et se déroulent en collaboration avec l'équipe de Hukai Xie (Université de Floride) et concernent simultanément des applications de type plateformes actionnées instrumentées (pour le micro-assemblage), comme l'intégration de microsystèmes actionnés au sein de MOEMS ou de micro-bancs optiques. Pour ces travaux, le rôle d'AS2M portait principalement sur les étapes de modélisation multi-physique, d'identification, de validation expérimentale des modèles et de commande.

Ces différents travaux (plateforme instrumentée et plateformes actionnées), nous ont permis d'identifier les points et solutions clés pour nos applications et ont conduit à la proposition d'une plateforme de nanositionnement possédant 8 actionneurs (structure d'unimorphe permettant de réaliser des mouvements selon deux directions, 2.5 mm de longueur) et intégrant une mire codée (voir section 4.3 du chapitre 4) utile à l'estimation de positions et de forces de contact. La structure conçue (voir Fig. 5.19(c)) permet à la plateforme mobile, de réaliser des mouvements dans l'espace (jusqu'à 20 μm selon la normale au plan de la structure). Les performances attendues par cette structure sont assez singulière par rapport à la littérature. En effet, les structures aussi compactes exploitent l'effet électro-thermique permettant de larges déplacements dans des volumes restreints, mais s'avèrent extrêmement limitées dynamiquement (bande passante de quelques hertz). La structure proposée permet des déplacements quasiment équivalents, mais avec une bien meilleure dynamique.

Les différentes plateformes étudiées ont nécessité des travaux de nature très diverses et donc des compétences variées et nombreuses. Ils ont notamment conduit à des collaborations internationales avec les équipes de H. Xie (Université de Floride, USA), de P. Lambert (Université libre de Bruxelles, Belgique) et G. Wiens (Université de Floride, USA), une collaboration avec le département de mécanique de Femto-st (Patrick Sandoz) et permis d'accueillir Paul Moore pendant sa thèse effectuée à l'université de Floride. Enfin, des contributions conséquentes ont également été réalisées dans le cadre des post-doctorats d'Alex Bienaimé et Vincent Chalvet ainsi que des stages de Valérian Guelpa, Kamel Ncir, Nathalie Majcherczyk et Alberto Espinosa. Ces différents travaux ont conduit à des articles publiés dans des revues (J17, J21 et J24) et en conférences (C21, C29, C35, C38 et C44).

5.5/ CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce chapitre portait sur l'étude des technologies permettant de résoudre certains verrous liés à des besoins forts en systèmes plus petits, plus intelligents, plus performants et intégrant plus de fonctionnalités. Le chapitre 3 a montré que cette tendance générale possède un intérêt extrêmement particulier à l'échelle micrométrique compte-tenu du manque de systèmes miniatures, du manque de moyens de mesures intégrés et des nombreuses spécificités les rendant pourtant indispensables (forces de surface prédominantes, dynamiques, influence de l'environnement...).

Ainsi, ce chapitre nous a permis d'étudier en premier lieu différentes briques de base particulièrement intégrées et innovantes, induisant des performances uniques en regard de la littérature :

- actionneurs fondés sur du PMN-PT, qui est un matériau piézoélectrique encore mal connu. Son étude nous a permis de mieux comprendre son comportement, mais surtout d'établir tout son potentiel pour la microrobotique grâce à des déplacements d'environ deux fois supérieurs aux autres matériaux piézoélectriques, à un nombre de DDL plus important et à une hystérésis beaucoup plus faible ;
- actionneurs piézoélectriques à film épais induisant des structures actionnées de performances

comblant le gap important qu'il y avait entre les matériaux piézoélectriques à film fin et les actionneurs massifs ;

- capteur des microforces fondé sur un principe piézorésistif particulièrement intégré, de très bonne bande passante et de rapport plage de mesure/résolution particulièrement élevé.

Ce chapitre nous a également permis d'étudier ou de développer plusieurs systèmes micromécatroniques ou microrobotiques innovants et possédant des performances accrues en regard de la littérature. Certaines sont fondés sur les briques de base précédemment citées :

- une micropince PMN-PT[011] à 6 DDL possédant un très grand espace de travail et ne nécessitant plus d'utiliser des porteurs robotiques de nanositionnement ;
- un micro-banc-optique intégrant un actionneur PMN-PT[001] permettant des déplacements hors-plans très rapides ;
- une micropince piézoélectrique intégrée et instrumentée en force, qui sera utilisée pour la réalisation de cycles de micro-assemblages automatisés présentés au chapitre 6 ;
- plusieurs plateformes compliantes intégrées actionnées et/ou instrumentées de principes originaux issus de travaux collaboratifs.

L'ensemble de ces travaux a été réalisé en vue d'effectuer des tâches de micro-assemblages complexes et automatisées, mais adressent des problématiques générales. Ils constituent, par exemple, de très bonnes solutions pour des problématiques d'outils chirurgicaux mini-invasifs, pour l'instrumentation, pour la biologie ou pour la caractérisation mécanique de microcomposants. Ainsi, de très nombreuses perspectives sont imaginables, qu'il s'agisse de leur utilisation directe pour des problématiques de micro-assemblage ou pour d'autres problématiques. A noter que les technologies de microfabrication connaissent actuellement des progrès conséquents relatifs à la fabrication des matériaux piézoélectriques et permettent de réaliser des structures de formes de plus en plus complexes et fines ouvrant également de nouvelles perspectives.

COMMANDE HYBRIDE FORCE-POSITION

Ce chapitre présente les travaux de commande hybride force/position, qui ont conduit à l'automatisation de micro-assemblages complexes. L'approche dynamique, étudiée dans ce chapitre, fait suite aux travaux préliminaires (approche quasi-statique présentée en section 3.3.4 et réalisation d'une micropince instrumentée en force présentée en section 5.3). Elle vise notamment à traiter les problématiques spécifiques des transitions contact/non-contact comme la force de pull-off. Pour cela, le modèle dynamique non-linéaire de la micropince instrumentée est étudié. Il est alors associé à une commande hybride externe qui permet de contrôler certains axes en position et les autres en force. Pour les axes commandés en force, une nouvelle commande en impédance avec suivi de référence est proposée selon un principe non-linéaire par mode glissant avec estimation des paramètres en ligne. Cette commande a ensuite été mise en œuvre avec succès pour assembler des composants optiques (cas d'étude présenté en section 3.2.1) dont on ne connaît initialement aucune caractéristique. La robustesse de la commande proposée a également été mise à l'épreuve à travers la réalisation de nombreux cycles d'assemblage automatisés complets (prise-guidage-dépose).

6.1/ INTRODUCTION ET POSITIONNEMENT DES TRAVAUX

Automatiser des tâches complexes de micro-assemblage possède un intérêt industriel certain (productivité, qualité constante....), mais également un intérêt scientifique important. En effet, cela nécessite une connaissance et maîtrise approfondie du comportement de chaque sous-système puisqu'il ne s'agit plus d'établir une preuve de concept mais de faire qu'un système complexe fonctionne de manière relativement répétable. Ces différentes raisons conduisent de nombreuses équipes à étudier l'automatisation de tâches de micro-assemblage par différentes approches présentées dans la littérature.

Une des approches les plus répandues consiste à exploiter un retour visuel. En effet, les plateformes de micro-assemblage intègrent plusieurs caméras. Celles-ci constituent un des seuls moyens techniques permettant de réaliser des mesures selon plusieurs directions de l'espace avec un rapport plage/résolution intéressant, sans trop contraindre l'espace de travail. Ainsi plusieurs approches et algorithmes de traitement d'images ont été étudiés, puis mis en œuvre pour réaliser des micro-assemblages automatisés [Wang et al., 2010a, Anis et al., 2010, Tamadazte et al., 2011, Wason et al., 2012]. Ces études démontrent la faisabilité de tâches automatisées par cette approche et illustrent également les limites actuelles : problèmes étudiés planaires, absence d'information sur les forces de contact, bande passante de mesure faible...

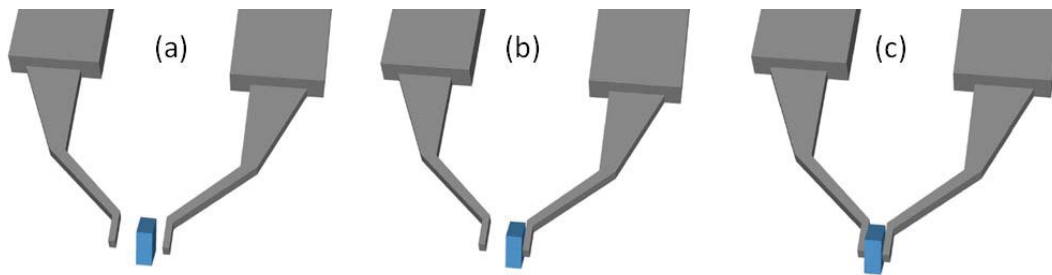


FIGURE 6.1 – Étapes pour la prise ou dépose d'un composant (a) aucun des deux doigts de serrage n'est en contact avec le composant (b) un des doigts de la micropince entre en contact avec le composant - situation typiquement instable (c) les deux doigts de la micropince sont en contact avec le composant - il est alors saisi.

La seconde alternative principale étudiée consiste à exploiter un retour en force. Des équipes utilisent des approches intégrant de nouveaux capteurs développés capables de mesurer les forces produites pendant un processus d'assemblage (typiquement inférieures à 1 mN) [Xie et al., 2010, Rakotondrabe et al., 2015] tandis que d'autres mettent en œuvre des capteurs disponibles dans le commerce comme des AFM [Xie and Régner, 2009] ou diapasons [Venant et al., 2010] (ces derniers sont plutôt utilisés pour la manipulation de composants de dimensions inférieures à $10\ \mu\text{m}$). Ces différentes études ont montré l'intérêt de la mesure des forces de contact, qui permet notamment de définir des stratégies de manipulation ou d'assemblage adaptées à l'échelle micrométrique.

Ces différents travaux récents de la littérature, ainsi que les études préliminaires présentées au chapitre 3, montrent que la réalisation de tâches complexes de micro-assemblage reste une problématique très ouverte et que les points suivants sont particulièrement clés :

- la commande proposée doit tirer avantage d'une association de différentes mesures complémentaires que sont force et position : la mesure des forces de contact devant être la plus directe possible pour éviter d'utiliser un modèle conduisant à une estimation ;
- les stratégies de micro-assemblage doivent tenir compte des spécificités de l'échelle micrométrique (force de pull-off, dynamiques, influence de l'environnement....) ;
- la commande proposée doit permettre de maîtriser les transitions contact/non-contact sources d'instabilité et d'imprécision : typiquement l'étape présentée en Fig. 6.1(b), c'est-à-dire lorsqu'un seul doigt de la micropince entre en contact avec le composant, induit une situation très instable du composant (une très faible force appliquée sur un composant miniature induit des accélérations très conséquentes) ;
- la commande proposée doit induire une bonne robustesse, notamment pour pallier les incertitudes et variations de comportement.

Pour cela, nous avons proposé une micropince piézoélectrique à deux doigts de serrage intégrant deux capteurs de microforces (présentée en section 5). Cette micropince permet ainsi d'établir les transitions contact/non-contact de manière dynamique et de mesurer la force de pull-off. Ce chapitre présente alors le modèle dynamique de cette micropince, dont l'objectif est notamment d'établir la relation non-linéaire entre les forces de contact, la position de l'extrémité de l'organe terminal et la tension d'alimentation de l'actionneur. Ce modèle considère les différents scénarios d'un processus de micro-assemblage et intègre notamment les mouvements libres (aucune force appliquée) et les mouvements contraints (une force est appliquée et contraint le mouvement). La validation expérimentale de ce modèle est ensuite proposée, puis utilisée pour identifier la position ou la raideur d'un microcomposant sans aucune

connaissance apriori le concernant.

La micropince est ensuite intégrée dans une station de micro-assemblage pour effectuer des tâches complexes de micro-assemblage, l'assemblage des composants optiques présentés au chapitre 3 étant utilisé comme cas d'étude. Une commande hybride force-position est ensuite étudiée pour automatiser des tâches complexes de micro-assemblage. Une stratégie particulière a également été proposée pour prendre en compte la force de pull-off (effet de collage relativement imprévisible). Ces différents travaux font l'objet d'une validation expérimentale qui est également présentée dans ce chapitre.

6.2/ MODÉLISATION DYNAMIQUE DE LA MICROPINCE INSTRUMENTÉE

La micropince instrumentée en force, qui a été présentée en section 5.3 et intégrée au sein d'une plateforme de micro-assemblage, présente plusieurs intérêts :

- pour une utilisation en mode téléopéré pour lequel une collaboration homme-robot est souvent recherchée à l'échelle micrométrique. Elle a pour but d'associer la dextérité du robot à l'intelligence de l'homme et ainsi apporter à l'opérateur une assistance dotée d'un sens tactile très utile ;
- pour une utilisation en mode automatique pour lequel un retour d'informations mesurées localement est indispensable pour réussir des tâches complexes.

Ces deux approches possèdent un dénominateur commun puisqu'elles peuvent toutes deux tirer avantage du modèle dynamique de la micropince. En effet, si la micropince dispose de capteurs permettant de mesurer dynamiquement et localement des forces de contact, il serait tout à fait intéressant de déterminer également la position de chaque organe terminal. Ce modèle permettrait, par exemple, d'estimer les caractéristiques dynamiques des contacts pendant les transitions contact/non-contact ou celles de l'environnement lorsqu'un composant maintenu entre les outils de la micropince subit une interaction avec un autre composant ou un rail de guidage.

Ainsi, nous avons pour objectif d'établir le modèle dynamique de la micropince c'est-à-dire le modèle liant la tension appliquée à son actionneur piézoélectrique, la position de son extrémité et la force mesurée par le capteur intégré.

Pour établir le modèle dynamique de la micropince, nous avons tout d'abord établi un schéma de principe équivalent présenté en Figure 6.2 reposant sur différentes hypothèses dont la validité sera vérifiée expérimentalement. Ainsi, nous considérons qu'un doigt de micropince comporte trois éléments majeurs :

- un actionneur piézoélectrique de longueur L_a dont une extrémité est encastrée sur un substrat (extrémité gauche sur la Figure 6.2). L'organe terminal de la micropince est fixée sur la seconde extrémité (point A) ;
- un élément rigide intitulé "Rigid Socket", de longueur L (partie non déformable de l'organe terminal) qui agit comme un levier mécanique, il est compris entre les points A et D ;
- une partie flexible (partie déformable de l'organe terminal permettant de mesurer la force extérieure appliquée au point C, le capteur étant présenté en section 5.3.2) représentée par un système masse-ressort-amortisseur entre les points D et C.

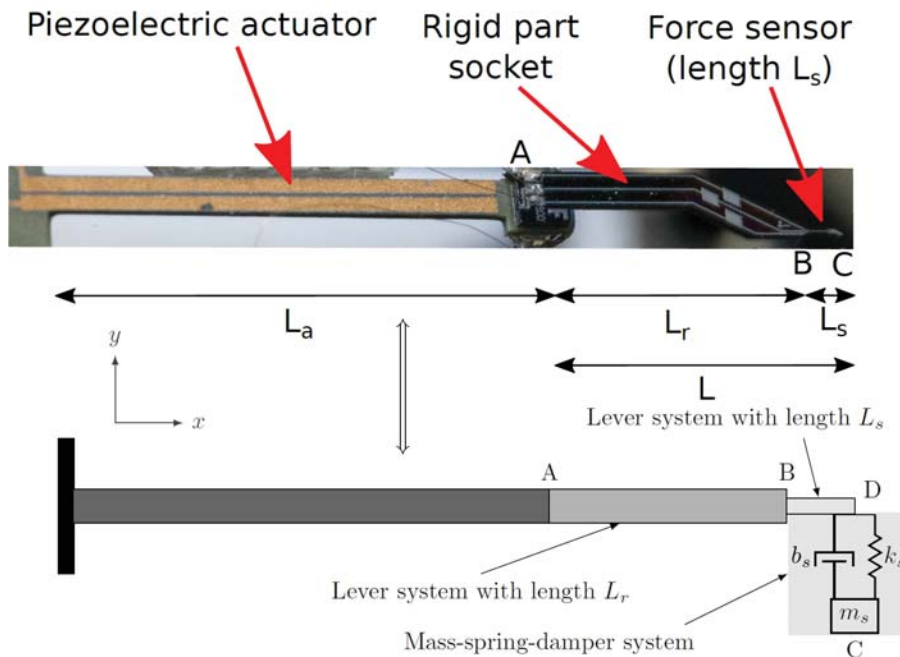


FIGURE 6.2 – Éléments constituant un doigt de micropince (photo et schéma de principe équivalent utilisé) : actionneur piézoélectrique encastré sur lequel est monté un organe terminal, lui même constitué d'une première partie rigide et d'une seconde souple.

Ce schéma équivalent associé aux différentes étapes d'un processus d'assemblage conduit aux 4 états suivants présentés en Figure 6.3 :

- Figure 6.3(a) : état initial de la micropince, aucune tension n'est appliquée à l'actionneur ($U = 0$) et aucune force extérieure n'est appliquée aux organes terminaux ($F_s = 0$) ;
- Figure 6.3(b) : mouvement libre des doigts de la micropince, une tension est appliquée à l'actionneur $U \neq 0$ et aucune force extérieure n'est appliquée aux organes terminaux ($F_s = 0$) ;
- Figure 6.3(c) : état transitoire entre le mouvement libre et le mouvement contraint ($F_s = 0$) ;
- Figure 6.3(d) : mouvement contraint des organes terminaux, $U \neq 0$ et $F_s \neq 0$.

Cette Figure 6.3 associe aux deux types de mouvements (libre et contraint) un schéma décrivant le principe de la modélisation utilisé dans chaque cas. Ce schéma emploie les notations suivantes qui seront utilisées par la suite : U_i est la tension appliqué à l'actionneur piézoélectrique du doigt i ($i = 1$ ou $i = 2$), y_{Ai} , y_{Di} et y_C les déplacements respectifs des points A, D et C du doigt i selon l'axe y , F_g la force extérieure appliquée par l'environnement sur le doigt de pince au point C, F_A est la force appliquée par l'organe terminal sur l'actionneur piézoélectrique au point A, M_A le moment en A dû à F_g et α_A l'angle de l'extrémité de l'actionneur lorsqu'il fléchit ($\alpha_A = 0$ au repos).

Compte-tenu de ces éléments, la modélisation dynamique de la micropince, pendant les différentes étapes d'un processus d'assemblage, se décompose en l'étude des trois modèles suivants présentés dans la suite de ce document : (1) modélisation de l'actionneur piézoélectrique (2) modélisation de l'organe terminal instrumenté (3) intégration de ces modèles élémentaires pour constituer le modèle complet de chaque doigt de la micropince.

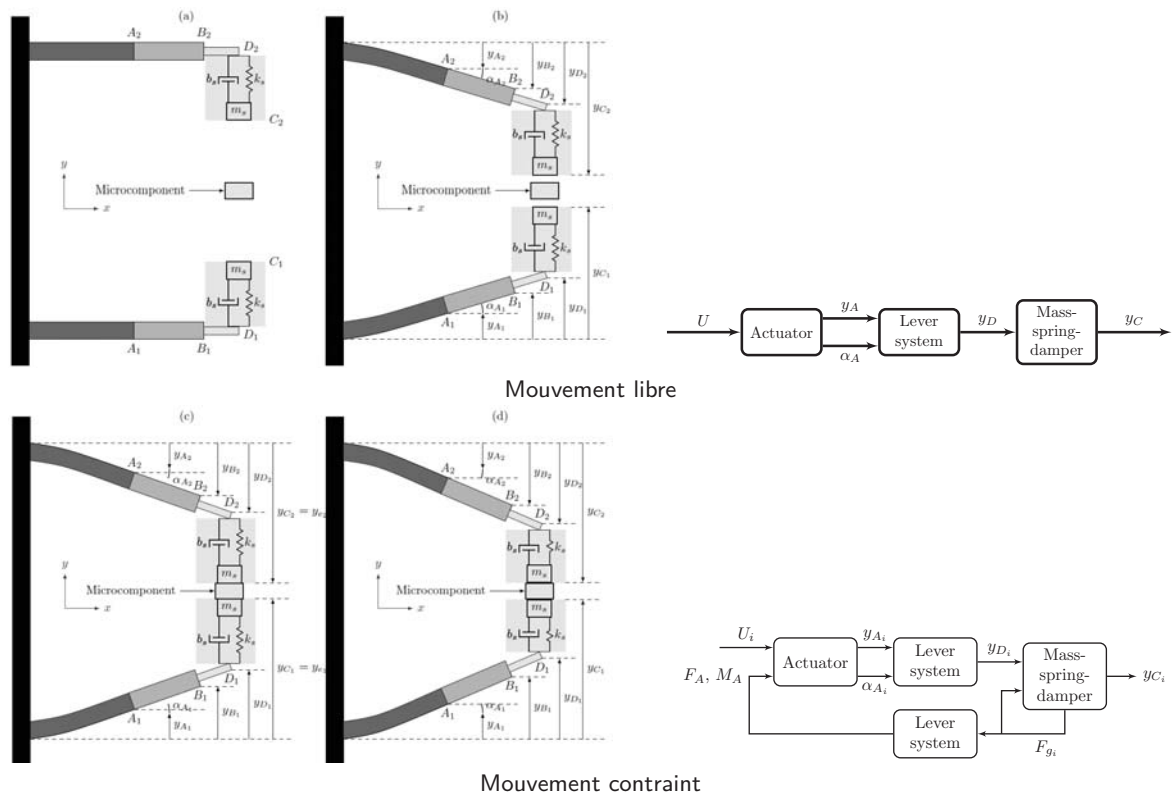


FIGURE 6.3 – Schémas équivalents de la micropinçe et schémas de principe associés présentant les étapes de modélisation pour le cas où les doigts de la pinçe effectuent un mouvement libre (aucune force exercée par l'environnement sur les organes terminaux de la micropinçe) et pour le cas où les mouvements sont contraints.

6.2.1/ MODÉLISATION DYNAMIQUE NON-LINÉAIRE DE L'ACTIONNEUR PIÉZO-ÉLECTRIQUE

Le modèle recherché ici (Figure 6.3) consiste à déterminer l'expression dynamique liant :

- les variables que nous considérerons comme entrées de l'actionneur c'est-à-dire la tension appliquée à l'actionneur piézoélectrique de la micropinçe (U) ainsi que la force et le moment exercés en A par l'organe terminal sur l'actionneur, respectivement F_A et M_A ;
- les sorties c'est-à-dire y_A le déplacement de son extrémité A et α_A l'angle de l'extrémité de l'actionneur.

Le modèle présenté intègre les variables de force et de moment et est utilisé aussi bien pour les mouvements contraints du doigt de la pinçe que pour les mouvements libres (F_A et M_A étant considérés nuls dans ce cas). Les principales spécificités des matériaux piézoélectriques à considérer sont leur comportement hystérétique qui nuit à la précision des mouvements réalisés, leur dérive (perte progressive et relativement lente de charges) et leur réponse oscillatoire.

D'un point de vue général, la littérature comporte de nombreuses études relatives aux actionneurs piézoélectriques qu'il s'agisse de problématiques de conception [Wang et al., 2014a, Choi et al., 2014], de modélisation [Chen and Li, 2015] ou de commande [Gu et al., 2014, Eilsen et al., 2014]. De nombreuses études concernent des systèmes miniaturisés intégrant des actionneurs piézoélectriques et proposent différents modèles de ce type d'action-

neur [Peng and Chen, 2014, Cao and Chen, 2014, Peng and Chen, 2013, Low and Guo, 1995, Smits et al., 1991]. Les différences principales entre ces modèles résident dans la manière de représenter les non-linéarités et la dynamique de l'actionneur. Le modèle présenté exploite ces différents travaux et repose sur les choix/hypothèses suivants effectués selon un critère principal de compromis précision/dynamique :

1. le comportement dynamique de l'actionneur est modélisé par une fonction de transfert de second ordre $D(s)$ de gain statique unitaire. Si l'utilisation d'ordre plus élevé est possible, plusieurs études ont montré l'intérêt d'un second ordre [Low and Guo, 1995, Rakotondrabe et al., 2009, Xu and Li, 2012] ;
2. l'hystérésis est modélisée par une première fonction non-linéaire représentative du comportement statique (que nous avons choisi de modéliser par un modèle de Bouc-Wen) associée à la dynamique de l'actionneur. Ce point de vue est régulièrement utilisé avec succès, par exemple dans [Rakotondrabe et al., 2009, Komati et al., 2014b] ;
3. la dérive ne sera pas modélisée compte-tenu de sa faible dynamique induisant une influence faible pour les systèmes commandés en boucle fermée.

Compte-tenu de ces hypothèses et des travaux présentés dans [Rakotondrabe et al., 2009, Ballas, 2007, Komati et al., 2014b, Smits et al., 1991], le modèle de l'actionneur piézoélectrique permet de définir, dans le domaine fréquentiel, l'expression de y_A (déplacement du point A) et de α_A (angle de l'extrémité de l'actionneur au point A) :

$$\begin{cases} y_A(s) = \left[d_p U - H_s(U) - s_p F_A - \frac{3}{2L_a} s_p M_A \right] \cdot D(s) \\ \alpha_A(s) = \left[\frac{2}{L_a} (d_p U - H_s(U)) - \frac{3}{2L_a} s_p F_A - \frac{3}{L_a^2} s_p M_A \right] \cdot D(s) \\ \text{avec : } D(s) = \frac{1}{as^2 + bs + 1} \end{cases} \quad (6.1)$$

Où s est l'opérateur de Laplace, d_p est la constante piézoélectrique de l'actionneur, $H_s(U)$ un opérateur représentant l'hystérésis statique de l'actionneur, s_p est la constante d'élasticité de l'actionneur, L_a sa longueur, a and b sont deux paramètres de $D(s)$ qui modélisent le comportement dynamique de l'actionneur.

[Low and Guo, 1995] présente un modèle de Bouc-Wen adapté aux spécificités de l'actionnement piézoélectrique qui conduit à représenter l'hystérésis dans le domaine temporel par :

$$\dot{H}_s(U) = \lambda \dot{u}(t) - \beta |\dot{u}(t)| H_s(t) - \gamma \dot{u}(t) |H_s(t)| \quad (6.2)$$

Où $H_s(t)$ est l'opérateur d'hystérésis de Bouc-Wen, $u(t)$ la tension appliquée à l'actionneur, λ un paramètre qui définit l'amplitude de l'hystérésis et β et γ des paramètres qui définissent la forme de l'hystérésis. Ce modèle définit ainsi le comportement de l'actionneur, c'est à dire le déplacement et l'orientation de son extrémité en fonction de sa tension d'alimentation et considère son comportement non-linéaire à travers la modélisation de l'hystérésis.

6.2.2/ MODÉLISATION DE L'ORGANE TERMINAL INSTRUMENTÉ

La modélisation de l'organe terminal vise à établir les relations entre les variables de l'extrémité de l'actionneur (point A : y_A , α_A , F_A et M_A) avec celles du point C représentées par y_C

le déplacement de l'extrémité de l'organe terminal et F_g la force extérieure appliquée par l'environnement sur ce point C. Nous avons fait l'hypothèse que l'organe terminal du doigt de micropince est constitué d'une première partie rigide (entre les points A et C définis dans la Figure 6.2) et d'une seconde partie flexible (entre C et D). Nous avons également considéré que la partie rigide, de longueur L agit comme un levier mécanique de dynamique négligeable en regard de celle de la partie flexible. Ces hypothèses conduisent aux expressions suivantes :

$$\begin{cases} y_D = y_A + L \sin \alpha_A \approx y_A + L\alpha_A \\ F_A = F_g + m_s \ddot{y}_C \\ M_A = LF_g \end{cases} \quad (6.3)$$

Nous avons aussi choisi de modéliser la partie flexible de l'organe terminal par un système masse-ressort-amortisseur (masse m_s , raideur k_s et coefficient d'amortissement d_s) ce qui permet d'établir la relation entre y_C et y_D :

$$-F_g = m_s \ddot{y}_C + b_s (\dot{y}_C - \dot{y}_D) + k_s (y_C - y_D) \quad (6.4)$$

ce qui conduit l'expression de Y_C dans le domaine de Laplace :

$$Y_C = \frac{b_s s + k_s}{m_s s^2 + b_s s + k_s} (Y_A + L\alpha_A) - \frac{1}{m_s s^2 + b_s s + k_s} F_g \quad (6.5)$$

6.2.3/ MODÉLISATION DYNAMIQUE COMPLÈTE DU DOIGT DE MICROPINCE INSTRUMENTÉ

Les différentes expressions établies dans les deux sections précédentes peuvent être combinées pour aboutir à celle du déplacement de l'extrémité C du doigt de la micropince suivante :

$$Y_C = G_u(s) (d_p U - H_s(U) - G_f(s) F_g) \quad (6.6)$$

avec :

$$\begin{cases} G_u(s) = \frac{b_1 s + b_0}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \\ G_f(s) = \frac{c_2 s^2 + c_1 s + c_0}{b_1 s + b_0} \\ \dot{H}_s(U) = \lambda \dot{U} - \beta |\dot{U}| H_s(U) - \gamma \dot{U} |H_s(U)| \end{cases} \quad (6.7)$$

où :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = k_s \\ a_1 = bk_s + b_s \\ a_2 = ak_s + bb_s + m_s + \left(1 + \frac{3L}{L_a} + \frac{3L^2}{L_a^2}\right) b_s m_s s_p \\ a_3 = bm_s + ab_s + \left(1 + \frac{3L}{L_a} + \frac{3L^2}{L_a^2}\right) b_s m_s s_p \\ a_4 = am_s \\ b_0 = \left(1 + \frac{2L}{L_a}\right) k_s, \quad b_1 = \left(1 + \frac{2L}{L_a}\right) b_s \\ c_0 = 1 + \left(1 + \frac{3L}{L_a} + \frac{3L^2}{L_a^2}\right) s_p k_s \\ c_1 = b + \left(1 + \frac{3L}{L_a} + \frac{3L^2}{L_a^2}\right) s_p b_s \\ c_2 = a \end{array} \right. \quad (6.8)$$

La connaissance du comportement complet d'un doigt de micropince instrumenté permet ainsi d'estimer par un modèle dynamique, la position de l'extrémité de la micropince y_C (point de contact avec l'objet manipulé) en fonction de la tension d'alimentation U et de la force extérieure F_g appliquée en C.

6.2.4/ IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES ET VALIDATION EXPÉRIMENTALE DES MODÈLES

L'identification des paramètres du modèle présenté précédemment a été effectuée par une succession de plusieurs étapes mettant en œuvre plusieurs plateformes expérimentales. En effet, de trop nombreuses contraintes techniques empêchent de réaliser cette identification plus directement.

Ainsi, une première plateforme permet d'identifier les paramètres de l'organe terminal m_s , k_s et d_s , le capteur de force ayant été préalablement étalonné pour déterminer s_p . Pour cela, les capteurs seuls sont montés sur des axes nanorobotiques, et l'identification est réalisée via la réponse libre (un outil vient appliquer une force extérieure puis la retirer brutalement, pendant ce temps un interféromètre mesure la position du point C). Les paramètres dimensionnels retenus sont ceux définis par leur conception.

Les organes terminaux sont alors fixés à l'extrémité de l'actionneur piézoélectrique pour permettre l'identification des paramètres de l'actionneur qui est réalisée en trois étapes. Tout d'abord, les paramètres statiques d_p , λ , β et γ sont identifiés en alimentant l'actionneur par un signal sinusoïdal de faible fréquence (0,1 Hz) qui permet de minimiser $D(s)$ [Rakotondrabe et al., 2009]. Cette expérimentation est réalisée sans qu'aucune force ne soit appliquée laissant ainsi les doigts de la micropince osciller librement, mais en mesurant le déplacement du point B via un interféromètre. Dans un second temps, une réponse indicielle (déplacement du point B en fonction de la tension d'alimentation) permet d'identifier les coefficients de $D(s)$. Enfin, la constante d'élasticité de l'actionneur s_p est identifiée en appliquant une force en B via un capteur de force externe de référence et en mesurant la déflexion de B induite par celle-ci (pour $U = 0$). Le tableau 6.1 présente tous les coefficients ainsi identifiés.

	Paramètres	Doigt gauche	Doigt droit
Actionneur	d_p ($\mu\text{m}/\text{V}$)	0.77	0.78
	s_p (m/N)	9.1×10^{-4}	8.5×10^{-4}
	λ	0.43	0.39
	β	10.8×10^{-2}	11.1×10^{-2}
	γ	7.5×10^{-3}	3.5×10^{-3}
	a	2.5×10^{-8}	2.5×10^{-8}
	b	8×10^{-5}	8×10^{-5}
Organe terminal instrumenté	m_s (Kg)	1.8×10^{-6}	1.79×10^{-6}
	b_s (N.s/m)	7×10^{-4}	6.98×10^{-4}
	k_s (N/m)	128	130.8
	sensibilité ($\text{V}/\mu\text{N}$)	6×10^{-3}	5.1×10^{-3}

TABLE 6.1 – Valeurs des paramètres identifiés pour chaque doigt de la micropince.

Ces étapes d'identification sont suivies d'expérimentations visant à valider le modèle étudié, les hypothèses effectuées et l'identification des paramètres. Plusieurs expériences ont ainsi été conduites, une première visant à valider le modèle de mouvement libre via l'application de tensions sinusoïdales de différentes amplitudes et fréquences. La Figure 6.4(a) présente les résultats obtenus. Une seconde expérience permet d'étudier le comportement des doigts de micropince lorsque leurs mouvements sont contraints. Cette étude est réalisée en appliquant successivement une tension et une force extérieure F_g appliquée au point C. La Figure 6.4(b) présente ainsi les résultats obtenus et montre notamment les transitions entre mouvements libres et mouvements contraints. Ces étapes de vérification montrent que le modèle permet d'estimer avec précision les mouvements libres et contraints (moins de 5% d'erreur sur l'estimation de la position malgré une bonne dynamique d'actionnement supérieure à 1 kHz et de mesure 8,5 kHz).

Cette micropince instrumentée et son modèle dynamique ont été également utilisés pour estimer les dimensions et la raideur de différents composants (dont les caractéristiques sont a priori inconnues). Les résultats obtenus s'avèrent très satisfaisants puisque une erreur de moins de 10% est révélée pour l'estimation des dimensions et une erreur de moins de 5% est observée pour l'estimation de la raideur.

Ces travaux de modélisation dynamique de la micropince instrumentée ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Bilal KOMATI et font l'objet d'un article actuellement soumis à T-Mech. Le modèle étudié est ensuite utilisé pour établir la commande de la micropince et plus largement de la plateforme d'assemblage afin de réaliser des opérations de micro-assemblage automatisées. Ces travaux sont présentés dans la section suivante.

6.3/ STRATÉGIES D'ASSEMBLAGE ET D'AUTOMATISATION

Cette section vise à définir la stratégie pour assembler des composants optiques présentés en section 3.2 sur leur substrat. La Figure 6.5 présente les différentes étapes de ce processus d'assemblage, dont les trois principales sont génériques à de nombreux processus de micro-assemblage :

- tâche de prise du composant (étape 1 de la Figure 6.5) ;
- tâche de guidage du composant dans le rail du substrat (étape 3 de la Figure 6.5) ;
- tâche de dépose du composant à la position souhaitée (étape 4 de la Figure 6.5).

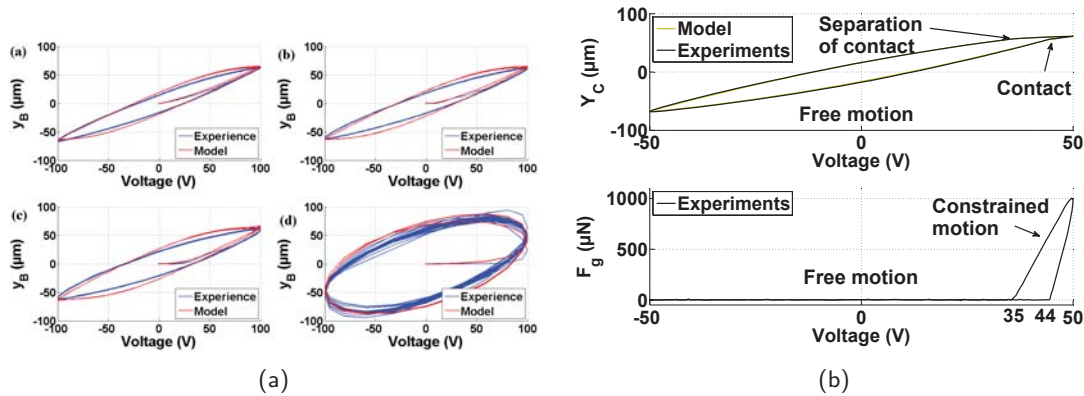


FIGURE 6.4 – Comparaison modèle/mesure du comportement dynamique des doigts de micropince (a) comparaison du déplacement du point B pour des mouvements libres et différentes fréquences d'alimentation (b) comparaison du déplacement du point C pour des mouvements contraints ($F_g \neq 0$).

Ces trois étapes clés sont étudiées individuellement lors des trois prochaines sections conduisant à proposer une stratégie propre à chacune pour les réaliser.

6.3.1/ STRATÉGIE DE PRISE

La tâche de prise du composant doit permettre de saisir un composant à assembler entre les doigts de la pince. Elle doit induire une saisie stable mécaniquement et une position maîtrisée du composant au sein des doigts de pince. Cette tâche est très complexe à l'échelle micrométrique notamment lorsqu'un premier doigt de pince entre en contact avec le composant. Il s'agit de l'étape intermédiaire (b) de la Figure 6.1 qui induit une situation très instable mécaniquement compte-tenu de la très faible inertie des composants manipulés. Pour assurer une meilleure maîtrise possible de cette tâche, nous avons choisi de contrôler dynamiquement les forces d'interaction entre chaque doigt de la micropince et le composant à saisir. Ainsi, les deux actionneurs de la micropince (correspondant aux deux doigts de serrage) sont contrôlés en utilisant une commande en impédance par mode glissant qui sera présentée en section 6.5.2.

6.3.2/ STRATÉGIE DE GUIDAGE

Une fois le composant saisi, la tâche consistant à le guider le long du rail (mouvement principal selon l'axe x sur la Figure 6.6(a)) du substrat est réalisée. Elle consiste à générer un déplacement relatif de l'ensemble pince-objet par rapport au substrat, l'axe principal du mouvement de guidage étant l'axe x . Pendant cette tâche, différentes forces latérales apparaissent dues à des contacts entre le composant et le rail de guidage. Ceux-ci peuvent engendrer la perte du composant ou la modification de sa position entre les doigts de pince. Une étude préliminaire nous a permis d'établir que les forces selon l'axe y sont les plus critiques. Elle nous a également permis d'identifier des seuils de force pour lesquels la prise du composant peut être considérée comme stable mécaniquement (sans que la position du composant ne soit affectée). La Figure 3.13 du chapitre 3 a permis d'exposer un résultat typique notamment que F_y doit rester inférieure à $90 \mu\text{N}$. Cependant, cette force de contact ne peut pas être directement mesurée, aussi nous choisissons de l'estimer en utilisant les mesures induites par les capteurs de force de

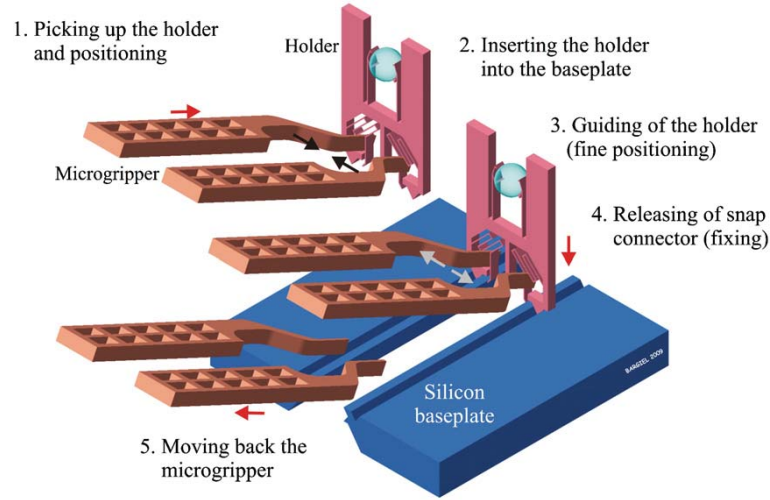


FIGURE 6.5 – Étapes du processus d'assemblage d'un composant optique sur son substrat : (1) Prise du composant (2) Insertion du composant saisi dans le substrat (3) Guidage du composant dans le rail du substrat (4) Dépose du composant sur le substrat (5) Retrait de la micropince.

serrage F_{y1} et F_{y2} . La seconde loi de Newton nous permet ainsi d'établir la relation dynamique écrite selon l'axe y suivante :

$$F_{y1} + F_y - F_{y2} = m_p \times a = m_p \times \ddot{y}_C \quad (6.9)$$

où m_p est la masse du composant manipulé, a l'accélération de ce composant selon y . Tant que $F_y \leq 90\mu N$, le contact entre l'extrémité des organes terminaux de la micropince et le composant manipulé reste planaire conduisant aux hypothèses que l'accélération est principalement portée par l'axe y et qu'elle est égale à celle des extrémités des organes terminaux. Ainsi, en utilisant l'équation 6.6, nous écrivons la relation permettant d'estimer la force de contact latérale \hat{F}_y dans le domaine de Laplace :

$$\hat{F}_y = (F_{y2} - F_{y1}) + m_p s^2 [G_u(s) (d_p U - \Gamma(U)) - G_f(s) F_{y1}] \quad (6.10)$$

Une plateforme expérimentale nous a permis de comparer cette estimation de la force de contact latérale avec une mesure de celle-ci réalisée par un capteur externe référent aussi bien statiquement que dynamiquement (voir Figure 6.6(b)). Cette estimation associée au seuil de $90\mu N$ nous permet de déterminer la vitesse de guidage maximale (mouvement selon x).

Enfin, il est également important de noter qu'une fois un contact établi entre le composant manipulé et le rail, la force de pull-off apparaît. Comme l'étude présentée en section 3.3.1 l'a montré, l'intensité de cette force peut être conséquente et suffisante pour engendrer une forme de collage du composant sur le rail (selon la normale au contact). Par ailleurs, cette spécificité de l'échelle micrométrique se traduit par le fait que $\hat{F}_y = 0$ ne permet pas de savoir s'il y a contact ou non entre le composant et le rail. Ces différents éléments nous ont conduit à définir une stratégie de guidage consistant à essayer d'annuler \hat{F}_y dès qu'un contact apparaît afin de minimiser les effets de la force de pull-off et permettre au système de poursuivre le guidage selon x .

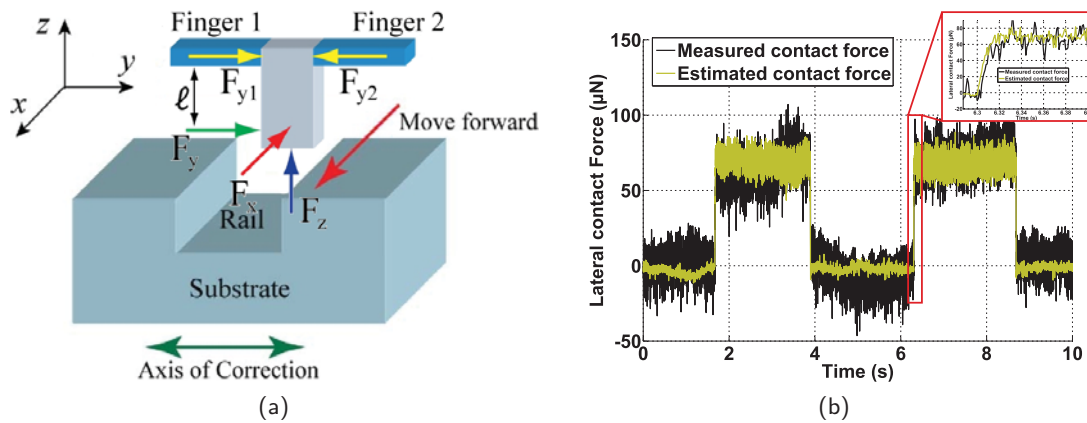


FIGURE 6.6 – Tâche de guidage : (a) Schéma de principe : le guidage consiste à déplacer le composant dans le rail selon l'axe x , des contacts composant/rail font apparaître des forces de direction principale suivant l'axe y (b) Comparaison de l'estimation de cette force de contact ($\hat{F}_y = f(F_{y1}, F_{y2})$) avec sa mesure (F_{ym}).

6.3.3/ STRATÉGIE DE DÉPOSE

La tâche de guidage se termine lorsque le composant optique atteint sa position souhaitée relativement au substrat. La tâche de dépose de ce composant débute alors. Pour cela, la micropince s'ouvre progressivement réduisant ainsi la force appliquée par chacun de ses doigts sur les ressorts du composant optique. Le double système de Vés du rail (présenté en section 3.2.1 du chapitre 3) permet de fixer le composant optique au substrat avant la fin de l'ouverture de la micropince. Ainsi la tâche de dépose se déroule sans avoir à considérer de forces d'adhésion.

6.4/ PLATEFORME DE MICRO-ASSEMBLAGE AUTOMATISÉ

La plateforme présentée en Figure 6.7 a été développée pour étudier l'assemblage automatisé de composants optiques. La structure robotique proposée a plusieurs buts notamment celui de permettre la mise en œuvre des stratégies d'assemblages présentées lors de la section précédente. Ainsi la plateforme est constituée de la micropince instrumentée (que nous avons intitulée TSFM) montée sur un porteur robotique constitué de 4 axes de micropositionnement selon une structure cartésienne $X_m Y_m Z_m \theta_m$. Le substrat est également monté sur un porteur robotique constitué de quatre axes (trois de nanopositionnement et un de micropositionnement) selon une structure cartésienne $X_n Y_n Z_n \theta_n$. Un préhenseur à dépression permet de sortir un composant optique de son wafer de fabrication, puis de le présenter à la micropince qui réalisera le cycle d'assemblage automatisé.

6.5/ COMMANDE DYNAMIQUE POUR L'AUTOMATISATION DE TÂCHES COMPLEXES DE MICRO-ASSEMBLAGE

6.5.1/ STRUCTURE GÉNÉRALE DE COMMANDE

Cette section présente les travaux d'automatisation de tâches complexes de micro-assemblage, dont les motivations ont été explicitées en introduction, ainsi que les raisons conduisant à

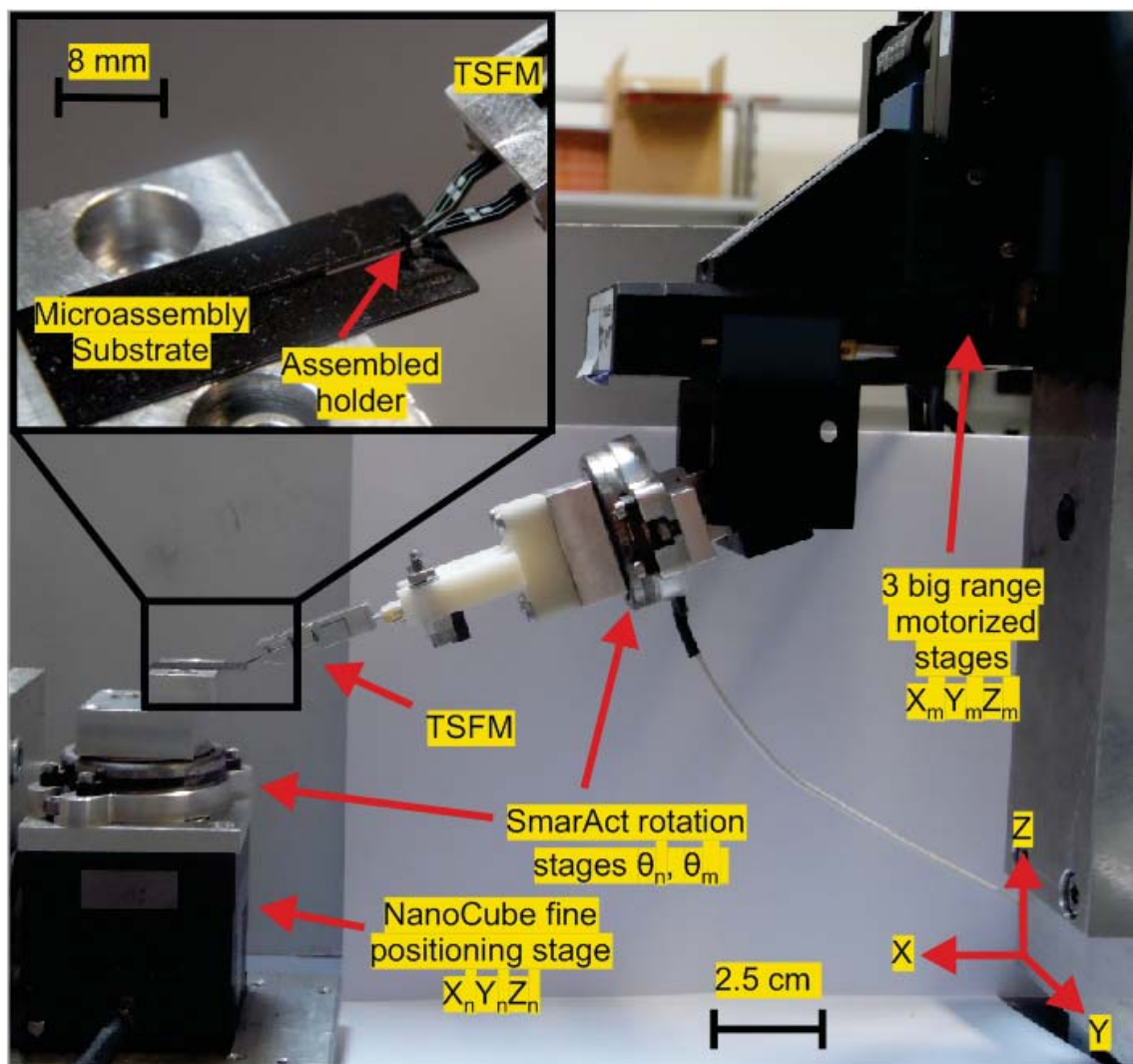


FIGURE 6.7 – Plateforme de micro-assemblage développée pour mettre en œuvre l'assemblage automatisé de composants complexes.

choisir une commande de type hybride force-position. Nous avons également établi l'importance de prendre en compte les transitions contact/non-contact de manière dynamique. Nous avons défini la stratégie d'assemblage en section 6.3 pour réaliser des cycles automatisés de prise-guidage-dépose. Outre ces éléments, il est important de noter que l'automatisation de tâches complexes de micro-assemblage a pour objectif intrinsèque de réaliser des cycles répétés et reproductibles malgré différentes perturbations, des conditions initiales changeantes ou des variations de paramètres. Par exemple, les caractéristiques (raideur, position) de l'objet manipulé sont initialement inconnues et peuvent varier lors de manipulations successives d'objets différents. Les conditions initiales, comme la position d'un objet avant sa prise, sont variables et induisent des caractéristiques mécaniques différentes pour chaque prise. Ces caractéristiques ou conditions initiales sont potentiellement très influentes sur l'automatisation (taux de réussite, précision de positionnement...) et requièrent une commande robuste ainsi qu'une identification en ligne des caractéristiques de l'objet [Boudaoud et al., 2015, Rakotondrabe et al., 2009, Xie et al., 2013].

Compte-tenu de l'ensemble de ces éléments, nous allons définir la structure de commande. Tout

d'abord, l'automatisation des tâches de micro-assemblage de composants optiques nécessite de contrôler la micropince (ouvertures/fermetures pour les tâches de prise et dépose), ainsi que les axes du porteur robotique (génération des déplacements relatifs entre le rail de guidage et le composant maintenu par les doigts de pince lors de la tâche de guidage). Compte-tenu de ces différents sous-systèmes à commander, la structure de commande comportera deux blocs principaux :

- un premier bloc pour commander l'ouverture et la fermeture de la micropince (commande en position puis en force) ainsi que les forces appliquées sur le composant pendant son serrage ;
- un second bloc pour commander le porteur robotique afin de contrôler les mouvements relatifs entre l'objet tenu par les doigts de pince et le substrat sur lequel il doit être assemblé (principalement pour réaliser le guidage du composant dans le rail du substrat).

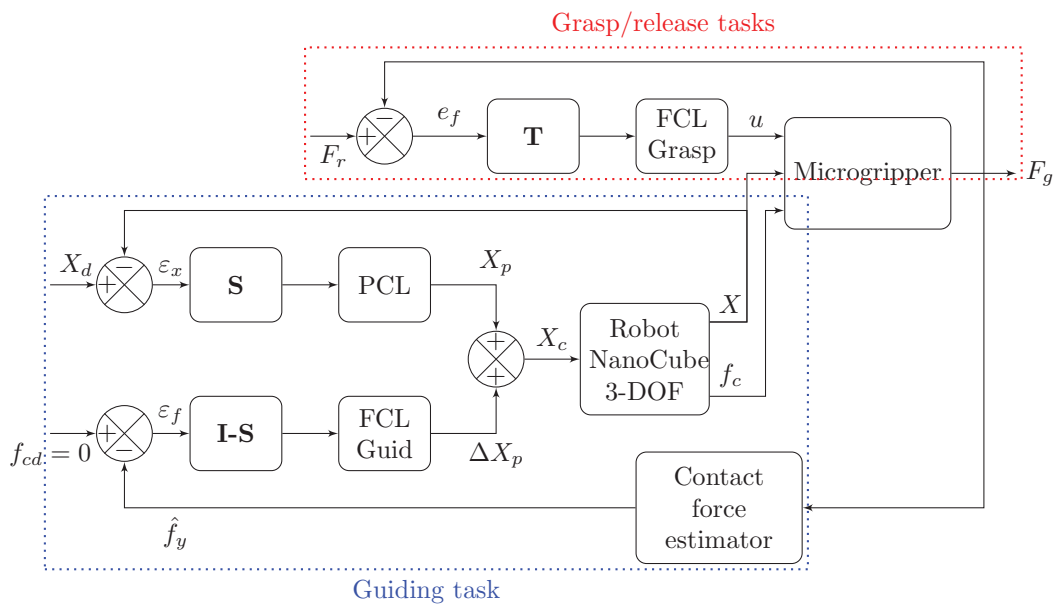


FIGURE 6.8 – Schéma de commande hybride force-position utilisé pour l'automatisation de cycles de micro-assemblage (prise-guidage-dépose).

La réalisation des tâches de guidage nécessite de commander certains axes en position (par exemple, la direction principale du guidage x) et d'autres en force (par exemple, la direction y selon laquelle des forces de contact latérales apparaissent pendant le guidage). Tout ceci conduit à choisir une structure de commande générale de type hybride force/position parallèle. Ce type de commande a été introduit par [Raibert and Craig, 1981] et son utilisation est répandue car elle permet de contrôler certains axes en position et d'autres en force.

Dans notre cas, les axes à commander en force (déplacements du composant selon y ainsi que les mouvements de doigts de la micropince) alternent des mouvements libres (sans force de contact) et des mouvements contraints (une force extérieure contraint le déplacement). Une commande hybride force/position de type externe sera appliquée à ces axes. Il s'agit d'une commande en cascade, dont la boucle externe en force est hiérarchiquement supérieure, et qui est particulièrement adaptée pour traiter les transitions contacts/non-contacts.

La Figure 6.8 présente la structure générale de la commande obtenue résultant de la combinaison des commandes parallèles et externes permettant de contrôler les deux sous-systèmes (micropince et porteur). Ainsi, le premier bloc, intitulé "Grasp/release Tasks" permet de contrô-

ler les tâches de saisie et de dépose. Il comprend les variables et blocs suivants :

- la consigne F_r est un vecteur constitué des deux forces de précharge (F_{r1} et F_{r2}) que chaque outil de micropince peut exercer sur le composant pour assurer sa saisie et son maintien, ainsi, $F_r = (F_{r1}, F_{r2})$;
- le contrôleur de cette boucle est constitué d'un bloc **T** qui permet de sélectionner la tâche à réaliser. Ce bloc peut prendre deux valeurs 0 (pour le guidage) ou 1 (pour la prise ou la dépose) ;
- le bloc intitulé "FCL Grasp" intègre la loi de commande de la micropince qui sera présentée en section 6.5.2) ;
- la sortie du système bouclé est le vecteur F_g dont les deux composantes F_{g1} et F_{g2} sont les forces mesurées par les capteurs intégrés à la micropince (mesure des forces de contact entre outils de micropince et composant manipulé).

Le second bloc, intitulé "Guiding Task" permet de contrôler la tâche de guidage et comporte deux consignes : $X_d = (x_d, y_d, z_d)$ vecteur définissant la position finale souhaitée du composant optique sur le rail à l'issue du guidage et f_{cd} la force de contact exercée par le rail sur le composant pendant son guidage. La stratégie retenue pour effectuer le guidage (explicitée en section 6.3.2) fait que f_{cd} est généralement nul. Compte-tenu de ces deux types de consigne, une matrice de sélection **S** est utilisée afin de définir les axes qui seront commandés en position et la matrice **I-S** ceux qui seront commandés en force. ε_x et ε_y sont respectivement les erreurs en position et en force, X la position mesurée avec les capteurs internes du nanocube (porte substrat). \hat{f}_y constitue l'estimation de la force de contact entre le composant et le rail précédemment explicitée par l'équation 6.10. Un premier correcteur, intitulé "PCL" sur la Figure 6.8, permet de contrôler la position. Ce correcteur est de type PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé). Le second correcteur, intitulé "FCL Guid", intègre également la loi de commande présentée en section 6.5.2.

6.5.2/ CONTRÔLE DYNAMIQUE DES TRANSITIONS CONTACT/NON-CONTACT

Les correcteurs, intitulés "FCL Grasp" and "FCL Guid" de la Figure 6.8 sont issus d'une commande hybride force/position de type externe et visent donc à commander certains axes (déplacements du porteur robotique selon y ainsi que les mouvements des doigts de micropince). Ces axes alternent mouvements libres (sans force de contact) et mouvements contraints (une force extérieure qui contraint le déplacement). Si différentes structures de commande sont possibles, nous choisissons d'utiliser une commande en impédance. Proposée par Hogan [Hogan, 1985], elle permet typiquement de contrôler les transitions contact/non contact de manière dynamique et a déjà été utilisée avec succès à l'échelle micrométrique [Xie et al., 2008, Xu, 2013b]. Plusieurs types de relations peuvent être choisies selon le type de modèles utilisés ou d'objectifs visés. Dans notre cas, suite à l'étude de la littérature et à différents essais comparatifs, nous avons retenu la relation suivante :

$$M_d(\ddot{y} - \ddot{y}_r) + D_d(\dot{y} - \dot{y}_r) + K_d(y - y_r) = f_r - f_g \quad (6.11)$$

où M_d , D_d et K_d sont respectivement la masse, le coefficient d'amortissement et la raideur de l'impédance visée permettant de définir la relation dynamique désirée. f_r et f_g sont respectivement la force de référence et la force de contact entre l'organe terminal de la micropince et le composant manipulé. Enfin, y_r et y sont respectivement la position de référence et la position estimée du point C (extrémité de l'organe terminal de la micropince,

point de contact avec le composant manipulé, voir Figure 6.2).

Les commandes en impédance nécessitent une estimation des paramètres de l'environnement (caractéristiques mécaniques et position initiale du composant manipulé dans le cas présent). Nous souhaitons effectuer cette identification en ligne pour différentes raisons : variabilité des tâches réalisées successivement, besoin de robustesse, rejet des perturbations... Cette étape est délicate puisqu'elle doit être réalisée suffisamment rapidement, pour ne pas engendrer d'instabilités. Il est également difficile de garantir un bon suivi de l'impédance en raison de la dynamique propre du porteur robotique ainsi que celle de l'estimateur. Pour cela, nous choisissons d'utiliser une commande par mode glissant dont la surface de glissement sera définie par l'impédance désirée. Nous choisissons également de définir l'erreur d'impédance e_i par la relation suivante :

$$e_i = M_d(\ddot{y}_r - \ddot{y}) + D_d(\dot{y}_r - \dot{y}) + K_d(y_r - y) + e_f \quad (6.12)$$

où $e_f = f_r - f_g$ constitue l'erreur entre la force de contact désirée et celle mesurée puis, la surface de glissement (notée σ) est définie à partir de l'erreur d'impédance ce qui se traduit par la relation suivante :

$$\sigma = (\dot{y}_r - \dot{y}) + \frac{D_d}{M_d}(y_r - y) + \frac{K_d}{M_d} \int (y_r - y) dt + \frac{1}{M_d} \int (f_r - f_g) dt \quad (6.13)$$

Quand le système rejoint la surface de glissement $\sigma = 0$ et $\dot{\sigma} = 0$, l'erreur d'impédance peut être écrite comme une fonction de la surface de glissement :

$$e_i = M_d \dot{\sigma} = 0 \quad (6.14)$$

les équations 6.6 et 6.13 permettent alors d'obtenir la commande équivalente dans le domaine de Laplace (notée u_{eq}) à appliquer pour avoir $\dot{\sigma} = 0$:

$$u_{eq}(s) = \frac{1}{d_p \cdot G_u(s)} Y_r - \frac{1}{d_p \cdot Z(s) \cdot G_u(s)} F_r + \frac{1 + Z(s) \cdot G_f(s)}{d_p \cdot Z(s) \cdot G_u(s)} F_g + \frac{1}{d_p} H_s \quad (6.15)$$

Par ailleurs, la commande u (Figure 6.8) est généralement définie par l'équation suivante où le terme $K \cdot \text{sgn}(\sigma)$ est utilisé pour atteindre la surface de glissement :

$$u = u_{eq} - K \cdot \text{sgn}(\sigma) \quad (6.16)$$

Ce type d'approche exploite une fonction tout ou rien, qui induit un broutement du système ce qui n'est, en pratique, pas souhaité. Aussi, nous proposons d'utiliser une autre relation exploitant, d'une part la norme de σ pour déterminer l'éloignement de l'état du système à la surface de glissement et, d'autre part, une fonction proportionnelle avec saturation selon l'expression suivante :

$$u = u_{eq} - K \text{sat} \left(\frac{\sigma}{\varepsilon} \right) \quad (6.17)$$

où ε constitue un seuil dont la valeur est choisie expérimentalement selon un compromis rapidité de convergence / oscillations induites par la commande, ainsi :

$$sat\left(\frac{\sigma}{\varepsilon}\right) = \begin{cases} sgn\left(\frac{\sigma}{\varepsilon}\right) & \text{if } \|\sigma\| > \varepsilon \\ \frac{\sigma}{\varepsilon} & \text{if } \|\sigma\| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (6.18)$$

Cette relation est équivalente à celle définie par l'équation 6.17 pour $\|\sigma\| > \varepsilon$ et permet ainsi une convergence vers la surface de glissement. Une fois le seuil atteint ($\|\sigma\| \leq \varepsilon$), la dynamique du système est une approximation de celle désirée définie par la surface de glissement.

Une fois la commande établie, reste à identifier les paramètres de l'environnement. Une étude préliminaire ainsi qu'une bibliographie a permis d'établir l'intérêt pour une identification en ligne dans le cas présent. Les paramètres à identifier sont la position du composant y_e (considéré comme environnement de la micropince) et la raideur de l'environnement. Pour identifier ces deux coefficients, chaque actionneur de la micropince est progressivement alimenté engendrant la déflexion de chacun de ses doigts. Cette déflexion débute par un mouvement libre (pas de contact composant-doigt de pince) et se poursuit par un mouvement contraint (chaque doigt de la micropince subit une force extérieure appliquée par le composant manipulé au point C). Lorsque ce contact apparaît (transition mouvement libre et contraint), le capteur de force du doigt concerné détecte une variation de force (valeur de $5 \mu N$ choisie : valeur supérieure au bruit du capteur), cette phase permet de déterminer y_e en utilisant le modèle dynamique des doigts de micropince. Lors du mouvement contraint, chaque capteur de force permet de mesurer la force extérieure appliquée par le composant sur les doigts de micropince f_g et le modèle dynamique de la micropince permet d'estimer la position du point C y_C (extrémité de la micropince en contact avec le composant manipulé). Ainsi la raideur \hat{k}_e peut être estimée par la relation suivante :

$$\hat{k}_e = \frac{f_g}{y_C - \hat{y}_e} \quad \text{if } y_C > \hat{y}_e \quad (6.19)$$

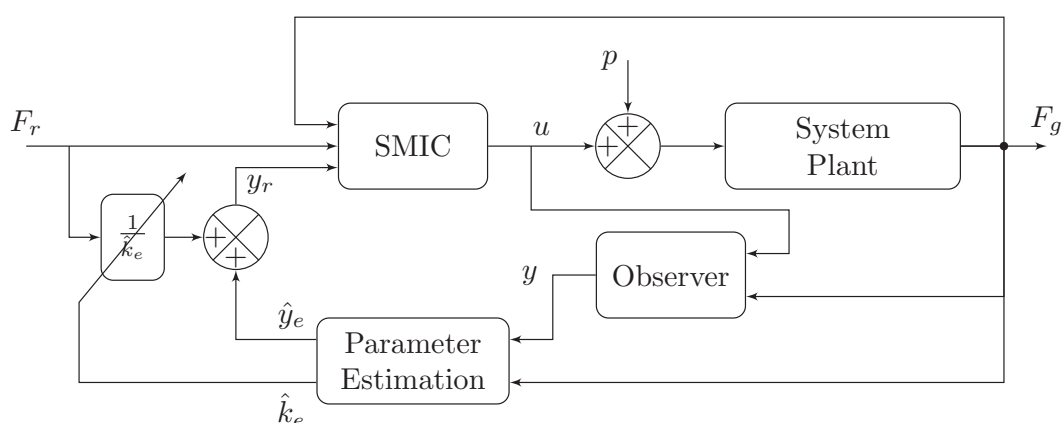


FIGURE 6.9 – Schéma de commande en impédance par mode glissant pour le suivi de force.

La Figure 6.9 synthétise le schéma de commande ainsi utilisé, intégrant le suivi d'une force de référence par commande en impédance à mode glissant (intitulé SMIC) et l'estimation en ligne des paramètres de l'environnement.

6.5.3/ RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

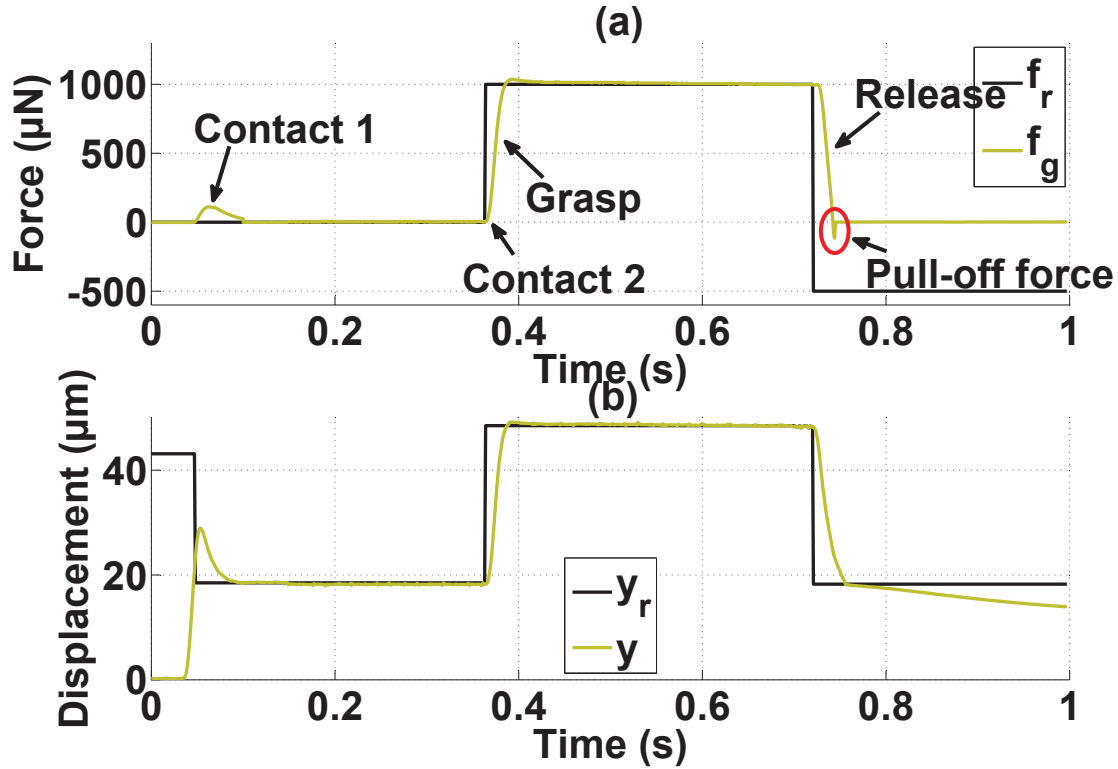


FIGURE 6.10 – Résultats expérimentaux pour la prise et dépose d'un composant : (a) Force de contact mesurée (f_g) comparée à la force désirée (f_r), (b) Position mesurée (y) comparée à la position de référence (y_r).

La structure de commande générale présentée en section 6.5.2 est mise en œuvre en utilisant la plateforme d'assemblage et les stratégies d'assemblage respectivement explicitées en sections 6.4 et 6.3 de ce chapitre. Les valeurs des paramètres d'impédance désirée sont choisis comme suit (USI) : $M_d = 1$, $D_d = 200$ et $K_d = 10000$. Une étape expérimentale préliminaire (contrôleurs inactifs) permet de réaliser une première estimation grossière des paramètres de l'environnement, ces valeurs sont ensuite intégrées au correcteur.

La Figure 6.10 présente le résultat expérimental obtenu (contrôleurs actifs), qui permet de visualiser l'évolution de la force de contact mesurée par un capteur de force, celle de la position du point de contact C (extrémité d'un outil de micropinçe avec le composant manipulé) ainsi que les consignes respectives visées. Le premier contact "contact 1" permet d'identifier y_e . Lorsqu'une consigne en force est saisie, le contrôleur établit alors le contact ("contact 2" sur la Figure 6.10) permettant d'identifier k_e tout en assurant le suivi en force et en position. Un temps de réponse de 30 ms (qui inclut donc le temps d'estimation de la raideur) et un dépassement de 3.7% sont ainsi mesurés lors de la saisie d'un composant. Une fois la saisie assurée, l'erreur statique reste nulle. La tâche de dépose est quant à elle effectuée grâce à une consigne en force négative (appliquée à $t \approx 0,72\text{ s}$) dont le but est d'engendrer une séparation du contact malgré la force de pull-off. Un temps de réponse de 19 ms est mesuré et la force de pull-off est également visible sur la courbe de force ($t \approx 0,75\text{ ms}$)

Lorsqu'un composant est saisi, la tâche de guidage de celui-ci dans le rail de guidage peut débuter. La direction principale du rail de guidage et celle de l'axe robotique x ne sont pas parallèles, en particulier la direction du rail n'étant initialement pas connue. Ce désalignement induit ainsi des contacts réguliers du composant sur le bord du rail lors du mouvement d'avance selon l'axe principal x . Pendant cette phase de guidage, \mathbf{T} est nul, seul le nanocube (porteur robotique du substrat donc du rail) engendre des déplacements relatifs entre le composant maintenu par les doigts de pince et le rail. La Figure 6.11 présente un résultat expérimental typique obtenu. Une vitesse de déplacement constante selon l'axe x de $25\mu\text{m}/\text{s}$ est utilisée pour cette expérience. L'apparition de contacts latéraux (forces exercées par le rail sur le composant selon y appelées f_y) induit des mouvements du nanocube (D_y) visant à annuler les forces associées conformément à la stratégie de guidage définie préalablement. Ces expériences permettent de réaliser des assemblages automatisés en 4 s sans que la position du composant entre les doigts de pince en soit affectée par les perturbations notamment dues aux contacts répétés du composant avec le rail de guidage. Différentes vitesses de guidage ont été testées avec succès jusqu'à une valeur de $5\text{ mm}/\text{s}$.

La robustesse de la commande a également été mise à l'épreuve à travers des expériences répétées ou par la réalisation d'expériences complémentaires comme celles dont le résultat est présenté en Figure 6.12. Celle-ci consiste à appliquer une force latérale consécutrice (avec contrôleur éteint) puis à allumer ce contrôleur au temps $t = 2,7\text{ s}$. Cette expérience montre que les mouvements engendrés selon l'axe y permettent d'annuler la précharge en moins de 50 ms . Ce temps est du même ordre de grandeur que le temps de réponse du nanocube (système de nanopositionnement qui engendre la correction).

Ces travaux d'automatisation de tâches complexes de micro-assemblage par commande hybride force-position ont fait l'objet d'études préliminaires conduites dans le cadre de la thèse de Kanty Rabenorofoa et ont été approfondies dans le cadre de la thèse de Bilal Komati. Ils ont fait l'objet de publications en revue (J11 en utilisant une approche quasi-statique), l'approche dynamique étant actuellement soumise à T-ASE, des résultats intermédiaires ayant été publiés en conférences internationales : C39 (commande dynamique pour un doigt de micropince), C37 (commande par impédance), C34 (comparaison de la commande en force explicite et commande en impédance pour le micro), C20 (stratégies de micro-assemblage spécifiques en micro), C23 (commande hybride pour le micro-assemblage automatisé) et C16 (contrôle en force pour le micro-assemblage).

6.6/ CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le chapitre 3 nous a permis de constater combien il est difficile de réaliser des tâches de micro-assemblage robotisées mais également de comprendre les principales raisons : manque d'outils adaptés, manque de mesures locales et adaptées, importance des forces de contact comme le pull-off, dynamiques très élevées, problèmes multi-directionnels...

Dans ce chapitre nous avons ainsi cherché à étudier cette problématique ce qui a conduit à proposer :

- un modèle dynamique de la micropince instrumentée validé expérimentalement ;
- une plateforme de micro-assemblage intégrant une micropince instrumentée en force présentée au chapitre 5 ;
- des stratégies originales pour chaque étape du processus d'assemblage intégrant les spécificités de l'échelle micrométrique (dynamique, force de pull-off...);

- une structure de commande permettant de commander simultanément les différents sous-systèmes en associant commande en force et commande en position, en apportant une attention particulière aux transitions entre mouvements libres et mouvements contraints ainsi qu'à la dynamique ou aux variations de paramètres.

Ces travaux ont conduit à automatiser des tâches complexes de micro-assemblage avec réussite apportant une contribution importante à l'état de l'art. Ces travaux possèdent de nombreuses difficultés comme l'identification des paramètres des modèles ou de la commande particulièrement délicate. L'obtention d'un modèle physique validé expérimentalement passe également par de nombreuses hypothèses remises en cause suite aux résultats expérimentaux. Cela a permis d'affiner progressivement la compréhension du comportement des différents systèmes et de choisir des éléments de structure de commande adaptés. Ces différentes avancées reposent sur une méthodologie scientifique et expérimentale extrêmement rigoureuse des deux doctorants ayant réalisé ces travaux (Kanty Rabenorosoa et Bilal Komati).

Ces travaux induisent des perspectives directes, comme leur utilisation pour différentes applications nécessitant la réalisation de micro-assemblages automatisés et/ou complexes. Il serait également très intéressant de mener des campagnes répétant différentes tâches de micro-assemblage afin d'étudier les différents paramètres influents sur la position du composant à l'issue de la réalisation de celles-ci. En effet, les travaux menés ne permettent pas de mesurer directement la position du composant dans l'espace, il est donc difficile de déterminer précisément le niveau de précision de position atteint. Des travaux relatifs aux mires codées pourraient typiquement être utilisés pour mesurer la position d'un composant pendant et après son assemblage, mais également la position de l'extrémité des organes terminaux de la micropince. Ce dernier point permettrait d'asservir la position des organes terminaux et conduirait à une meilleure reproductibilité des mouvements donc une meilleure précision.

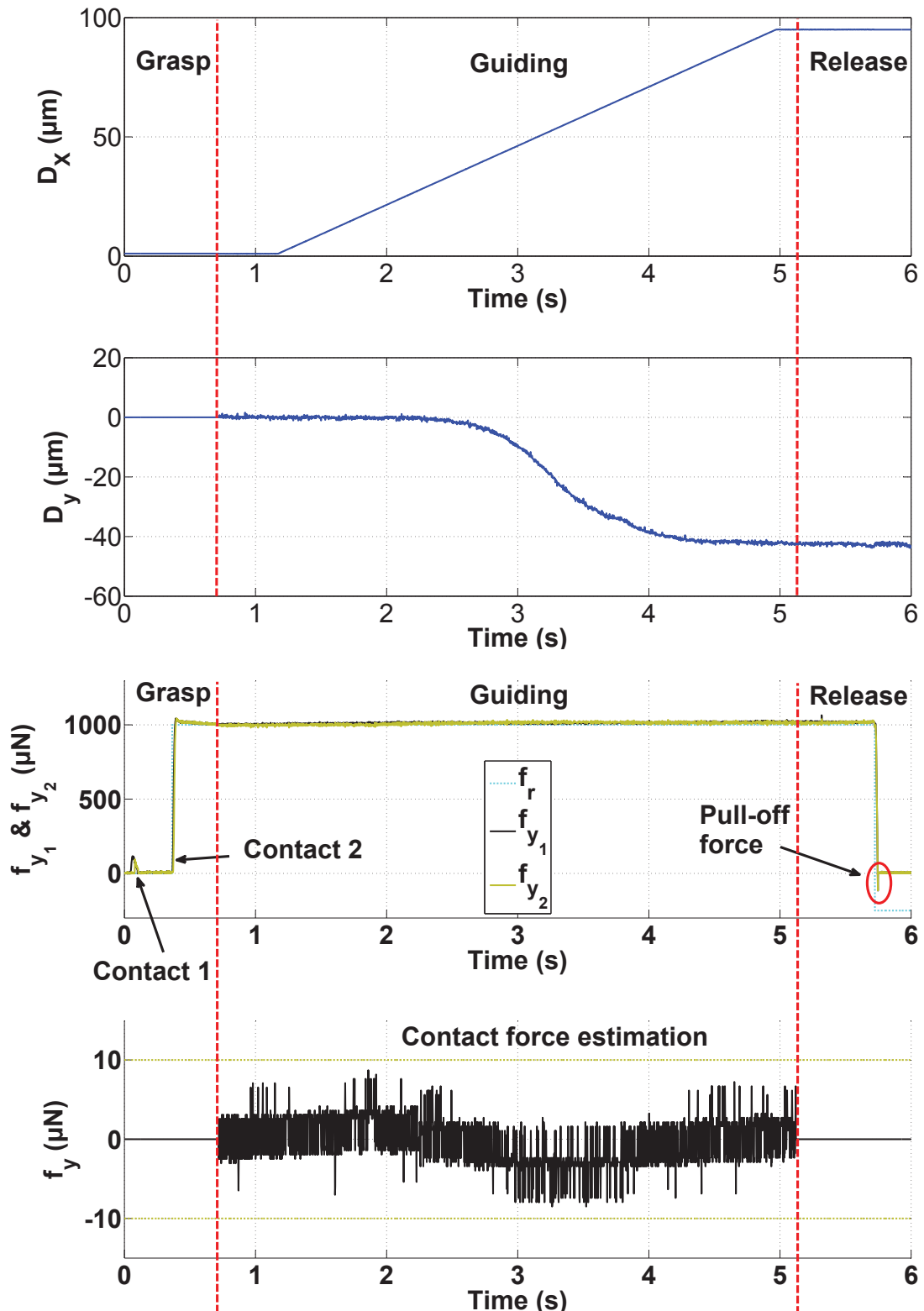


FIGURE 6.11 – Résultats expérimentaux de l'automatisation d'un cycle de prise-guidage-dépose où F_{y1} et F_{y2} sont les forces mesurées par les capteurs (contacts organe terminal de micropince-objet manipulé), F_y l'estimation de la force de contact objet-rail de guidage grâce à l'équation 6.10, D_x le déplacement selon l'axe de guidage (x) et D_y le déplacement selon l'axe perpendiculaire au guidage (y : axe de correction latéral).

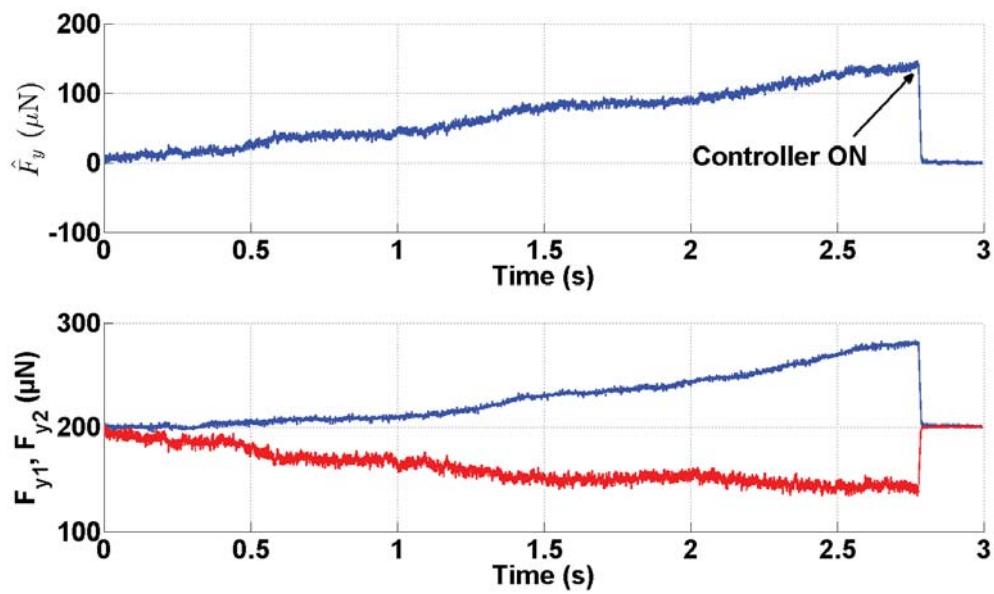


FIGURE 6.12 – Résultat expérimental pour l'étude du guidage automatisé d'un composant dans un rail montrant l'estimation de la force de contact latéral \hat{f}_y et son rejet lors de la mise en œuvre du correcteur.

VALORISATION DES TRAVAUX POUR DES ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT ET DE TRANSFERT INDUSTRIEL

Dans le cadre de mon métier d'enseignant-chercheur, j'ai toujours souhaité créer une synergie entre certaines activités de recherche scientifique, d'enseignement et de transfert à destination du milieu industriel. Ce chapitre présente en premier lieu les principaux travaux effectués en ce sens en lien avec le milieu industriel : contribution à la création de la société Percipio Robotics en 2011, participation à des projets d'innovation ou de collaboration directe avec des industriels ainsi que la pré-maturation en vue de créer une seconde entreprise. Ce chapitre présente ensuite les travaux réalisés en lien avec des formations adossées à la recherche (écoles d'été internationales, master de l'université de Franche-Comté et cycle d'ingénieur de l'ENSMM). Ils se sont traduits par des contributions à la création de nouveaux modules d'enseignement et de nouveaux contenus pédagogiques par des cours, des travaux dirigés et des transferts de plusieurs plateformes expérimentales pour des travaux pratiques.

7.1/ INTRODUCTION

Le métier d'enseignant-chercheur, que j'exerce, possède plusieurs facettes très intéressantes comme le fait de se situer à l'interface du triptyque recherche scientifique-enseignement-transfert industriel et permet, à ce titre, de les mettre en synergie. Ce chapitre vise à expliciter ces liens tissés au fur et à mesure des années, notamment parce que mes travaux de recherche reposent sur plusieurs volontés :

- comprendre les phénomènes ou le comportement des systèmes passe par des étapes de modélisation et de validations expérimentales poussées et génère un savoir-faire utile tant pour la formation des étudiants que pour les échanges avec les industriels ;
- échanger régulièrement avec des industriels : les évolutions des marchés (produits miniaturisés, systèmes de micro-assemblage par exemple) engendre des évolutions des besoins et font régulièrement apparaître des problématiques scientifiques pouvant être source pour certaines activités de recherche ;
- réaliser des systèmes réellement fonctionnels pour un bénéfice double : d'une part, cela prouve la compréhension fine des phénomènes en jeu et leur maîtrise et, d'autre part, cela augmente le TRL (acronyme Anglais pour "Niveau de Maturité Technologique") permettant des échanges précis et concrets avec des industriels ;
- assurer l'évolution des formations afin que les compétences des futurs diplômés suivent les

évolutions des besoins du milieu industriel et de la recherche scientifique (ce qui joue aussi bien sur l'insertion professionnelle des étudiants que l'apport de l'étudiant ou jeune diplômé dans la structure d'accueil).

Il résulte de mon travail des liens renforcés entre mes activités de recherche, d'enseignement et de transfert industriel. Concernant le transfert industriel, la section 7.2 présente les contributions de mes travaux pour la création de l'entreprise Percipio Robotics, pour des projets d'innovation ou de collaboration directe entre institut de recherche et entreprise, ainsi qu'une actuelle pré-maturation en vue de la création d'une seconde entreprise.

Enfin, la section 7.3 explicitera les principales activités de transfert vers l'enseignement, que j'ai pu conduire, à savoir la diffusion internationale (à travers une participation à des écoles d'été et des ouvrages de vulgarisation), la participation à de nouveaux modules d'enseignement associés à des contenus pédagogiques innovants pour plusieurs formations adossées à la recherche et enfin le transfert de plusieurs plateformes expérimentales.

7.2/ ACTIVITÉS DE TRANSFERT INDUSTRIEL

Les éléments majeurs de mes activités effectuées dans le cadre de la synergie recherche - transfert industriel sont :

- la création de la société Percipio Robotics qui commercialise des systèmes robotiques de micro-assemblage : incubation débutée en 2009, création de l'entreprise en 2011 ;
- le projet ANR (appel Émergence) "Mymesys" (acronyme Anglais de "High Performances Embedded Measurement Systems for multiDegrees of Freedom Microsystems" qui a conduit à de nouveaux actionneurs piézoélectriques à films épais présentés en section 5.2.2. Leurs performances uniques les rendent intéressants dans un cadre de transfert. Des travaux relatifs au self-sensing piézoélectrique (utilisation simultanée des effets directs et indirects du matériau permettant simultanément d'actionner et de mesurer) font actuellement l'objet d'une action de maturation ;
- le projet XX projet collaboratif entre l'institut FEMTO-ST (département AS2M) et une entreprise, le contenu du projet n'est pas mentionné dans cette version non-confidentielle ;
- la pré-maturation de capteurs de microforces (étude de marché, maturation technologique actuellement en cours).

Ces différents éléments sont détaillés dans les sections suivantes.

7.2.1/ CRÉATION DE PERCIPIO ROBOTICS

Pendant la période allant de 2006 à 2010, de très nombreux travaux relatifs au micro-assemblage ont été réalisés au sein de l'équipe SAMMI. Cet acronyme signifie Systèmes Automatisés pour la Micromanipulation et le Micro-assemblage et montre bien combien ces activités de micro-assemblage étaient centrales au sein du département AS2M (projets ANR Pronomia, ANR Nanorol, région MIAAMI, européen Hydromel...). Cette équipe fédérait ainsi l'ensemble des activités de recherche en microrobotique du département AS2M de l'institut FEMTO-ST. Fort des nombreuses études menées, d'une expérience accumulée depuis plusieurs années, des contacts directs avec des partenaires intéressés par le micro-assemblage, une partie de l'activité était consacrée à des développements technologiques afin d'en améliorer la maturité (typiquement faire progresser leur TRL). Cette période a également permis de former plusieurs jeunes



FIGURE 7.1 – Systèmes de micro-assemblage de l'entreprise Percipio Robotics (France) : (a) micropince piézoélectrique (b) plateforme de micro-assemblage modulaire chronogrip.

ingénieurs à ces technologies. Parmi eux, David Hériban a porté le projet de création de la société Percipio Robotics par une première étape d'incubation amorcée en fin d'année 2009 afin de créer l'entreprise en début d'année 2011.

Cette société compte actuellement 15 personnes et a été lauréate de très nombreux prix (échelle régionale, nationale et internationale) et commercialise principalement des plateformes modulaires de micro-assemblage intégrant notamment une micropince piézoélectrique (Fig. 7.1). Les systèmes proposés par l'entreprise possèdent une très grande versatilité et s'adaptent rapidement à des changements de production et de produits très différents. Ils permettent finalement, selon le besoin, de réaliser des tâches automatisées ou en mode téléopéré et s'avèrent aussi bien adaptés aux très petites qu'aux grandes séries de production.

Les activités, que j'ai mené, ont directement servi de socle à la création de la société Percipio Robotics et ont largement contribué aux produits actuellement commercialisés par l'entreprise, les principales étant :

- le développement de la première plateforme robotisée de micro-assemblage du département ;
- la réalisation des premiers micro-assemblages du département jusqu'à l'assemblage avec succès de produits industriels miniaturisés (un micro-roulement par exemple) ;
- l'étude et la mise en œuvre d'un principe de collage réversible et miniaturisé (travaux de maîtrise) ;
- l'étude (conception, modélisation et commande) d'une micropince piézoélectrique à 4 degrés de liberté ;
- l'étude et la mise en œuvre de porteurs microrobotiques, leur modélisation, leur commande, les architectures ou structures de commandes pertinentes.

La création de cette entreprise s'avère intéressante pour les activités scientifiques puisqu'elle réalise de nombreux développements technologiques. Ceux-ci sont nécessaires pour répondre à des besoins applicatifs très diversifiés, mais qui ne peuvent pas être conduits dans le cadre des activités de recherche de l'institut. Ces développements ont permis de mettre à disposition des industriels et des scientifiques des moyens de micro-assemblage facilement utilisables et configurables. Les nouveaux besoins de Percipio Robotics impliquent des problèmes scientifiques nouveaux (incluant par exemple de la modélisation, de la commande, des systèmes micromécatroniques très intégrés ou de la cobotique) pour lesquels nous sommes un partenaire scientifique privilégié. Associé à Percipio Robotics, nous avons une très bonne dynamique de soumission de projets au niveau national et international.

7.2.2/ PROJETS D'INNOVATION ET DE COLLABORATION INDUSTRIELLE

La maturité de certains travaux scientifiques et mon rôle central au sein du département AS2M pour certaines d'entre elles, m'ont conduit à initier ou être impliqué de manière très directe dans plusieurs projets d'innovation ou projets de collaboration directe entre l'institut de recherche et des entreprises. Nous pouvons, par exemple, citer les projets FRI-COCEMI (coordinateur), XX (coordinateur), ANR-MYMESYS (responsable de sous-projet) (voir liste des projets en section 9.1.4).

Le projet ANR MYMESYS (2012-2014, acronyme anglais de "High Performances Embedded Measurement Systems for multiDegrees of Freedom Microsystems") a permis l'étude de différents moyens de mesure intégrés mais de performances complémentaires. Ce projet, pour lequel j'étais responsable du sous-projet "Calibration Device Design and Tests", a permis de financer le post-doc d'Alex Bienaimé et a notamment conduit à l'étude de plateformes actionnées et instrumentées ainsi que de nouvelles structures piézoélectriques très intégrées et performantes (présentées au Chapitre 5). Ce projet a enfin conduit à la maturation de techniques de self-sensing piézoélectrique (utilisation simultanée des effets directs et indirects du matériau permettant simultanément d'actionner et de mesurer).

Le projet FRI COCEMI (2009-2013, acronyme anglais de "COntrol of Microrobotic CELls") a permis le financement de la thèse de Ning Tan et a contribué à l'étude des performances de systèmes de micro et de nanositionnement (voir Chapitre 4). Ces connaissances ont été très utiles par la suite, par exemple, dans le cadre du projet Mim-Hac.

Le projet XX (2012-2014, Micromanipulation Haute cadence) projet collaboratif entre l'institut FEMTO-ST (département AS2M) et une entreprise, le contenu du projet n'est pas mentionné dans cette version non-confidentielle ;

7.2.3/ PRÉ-MATURATION DE CAPTEURS DE MICROFORCES

La thèse de Bilal Komati avait différents objectifs, parmi lesquels, celui de réaliser des assemblages complexes et automatisés par commande hybride force-position (présentés au Chapitre 6). L'absence de capteurs commerciaux capables de mesurer des micro forces de préhension nous a conduit à consentir un effort important pour développer un capteur de microforces (présenté en section 5.3.2). Par ailleurs, si l'objectif principal de ce développement était de permettre l'intégration de ce capteur à la micropince piézoélectrique utilisée, l'étude, que nous avons menée, avait également pour but de couvrir un spectre plus large afin de conduire à un capteur dont l'utilisation pouvait être relativement générique, et donc potentiellement exploitable pour différents marchés.

Le développement effectué nous a permis de valider les très bonnes performances du capteur et son excellent positionnement par rapport à d'autres solutions issues de travaux de recherche ou commerciaux. En effet, la seule entreprise identifiée est l'entreprise Suisse Femtotoools qui propose des capteurs beaucoup plus encombrants et quasiment dédiés aux applications scientifiques comme la caractérisation mécanique de dispositifs miniatures. Nous avons également pu recenser de nombreuses applications, qui pourraient tirer avantage du capteur proposé (instrumentation, outils de chirurgie, biomédical, microsystemes, micro-assemblage robotisé....). Pour ces raisons nous avons souhaité nous inscrire dans les étapes préliminaires à la création d'une entreprise, projet actuellement porté par Bilal Komati.

Ces étapes préliminaires ont déjà débuté pendant la fin de la thèse de Bilal Komati grâce à un avenant à son contrat doctoral de type "conseil en entreprise" (en 2014, l'entreprise

étant Percipio Robotics). Celui-ci a permis en premier lieu d'étudier la facilité avec laquelle il était possible de transférer le capteur générique à un domaine applicatif donné. Le marché industriel du micro-assemblage robotisé est ici un domaine applicatif, dont les contraintes sont très différentes des problématiques traitées pendant la thèse. Cet avenant a également permis, dans un second temps, de déterminer l'apport du capteur au domaine applicatif visé et ainsi d'estimer l'intérêt potentiel de clients ou le type de contraintes industrielles à considérer.

A l'issue de la thèse, nous avons également initié une étape de pré-maturation en vue de la création d'entreprise. Celle-ci consiste en plusieurs étapes actuellement en cours, comme une étude de marché. Cette étude actuellement est mise en œuvre par la SATT Grand-Est (Société d'Accélération de Transfert de Technologies créée dans le cadre du fonds national de valorisation du Programme d'Investissements d'Avenir).

7.2.4/ AUTRES POTENTIELS

D'autres travaux de recherche actuellement en cours possèdent un potentiel de transfert industriel intéressant. A ce titre, ils font l'objet d'une attention particulière tant pour certaines orientations que pour la diffusion des résultats. Une veille spécifique est également réalisée pour identifier d'éventuelles applications, domaines applicatifs ou marchés pouvant être potentiellement intéressés par les issues de ces activités de recherche concernées. Ces différentes activités complémentaires aux activités scientifiques sont effectuées progressivement et permettent ainsi d'avoir une idée plus précise, sur l'intérêt qu'un transfert pourrait comporter, ou sur les résultats les plus porteurs en ce sens. Les travaux relatifs à la mesure par vision exploitant des mires périodiques ou pseudo périodiques, les actionneurs piézoélectriques à film épais, la réalisation de produits optiques hybrides miniatures et micro-assemblés (collaboration entre les départements MN2S¹ et AS2M ou Optique et AS2M de l'institut FEMTO-ST.) font, par exemple, l'objet aujourd'hui de cette attention particulière.

7.3/ ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT

Les progrès réalisés en recherche ont progressivement atteint une maturité permettant de proposer des évolutions de plusieurs formations adossées à la recherche. Ainsi, les différents quadriennaux associés à une souplesse de formations de l'université ont permis d'intégrer dans les enseignements proposés des thématiques nouvelles. Nous pouvons, par exemple, citer : la découverte du micromonde, l'influence des effets d'échelle, la modélisation et la mise en œuvre de matériaux actifs, la microfabrication, l'étude de la micromanipulation, du micro-assemblage, des systèmes micromécatroniques et microrobotiques...

Dans ce cadre, mes activités de recherche ont régulièrement conduit à des transferts de connaissances, de compétences, mais également de plateformes expérimentales vers les formations adossées à la recherche. Mon implication, en ce sens, couvre d'ailleurs un spectre plus large que le cadre strict de mes activités de recherche. Les principaux transferts effectués relatifs à mes activités de recherche sont présentés dans les trois sections suivantes et concernent :

- une diffusion internationale effectuée à travers un ouvrage et des écoles d'été ;
- la participation à la création de modules d'enseignements adossés à la recherche ;
- le transfert de plateformes expérimentales de la recherche vers l'enseignement.

1. MN2S : département Micro Nano Sciences et Systèmes de l'Institut FEMTO-ST

Ces transferts ont contribué à faire évoluer des formations et faciliter la sensibilisation des étudiants inscrits dans des parcours recherche. Ils ont également amélioré l'adéquation du profil des étudiants sortant de ces formations avec les besoins de recrutement dont nous avons besoin dans le cadre de nos activités de recherche.

7.3.1/ DIFFUSION INTERNATIONALE

Les activités de recherche menées ont également fait l'objet de diffusion de connaissances et de compétences au delà des formations Bisontines. En premier lieu, la maturité atteinte par les activités de recherche en microrobotique et micromanipulation a conduit à la rédaction d'un ouvrage intitulé "La microrobotique : application à la micromanipulation" grâce à l'initiative de Stéphane Régnier (ISIR, Paris) et de Nicolas Chaillet (FEMTO-ST, Besançon). Cet ouvrage a fait l'objet d'une première version Francophone puis d'une seconde Anglophone. Outre l'originalité des thématiques qu'il aborde, cet ouvrage intègre de nombreux exercices utiles pour faciliter la compréhension de phénomènes prépondérants, de spécificités et d'ordres de grandeurs atypiques à l'échelle micrométrique. Mes activités de recherche ont induit une contribution dans un chapitre intitulé "Architecture d'une station de micromanipulation".

J'ai également pu participer aux deux écoles d'été suivantes :

- "highlight in Microtechnology" : intervention pour des travaux pratiques ;
- "microrobotics and self-assembly for hybrid MEMS" organisée dans le cadre du projet européen Hydromel : intervention pour des travaux pratiques et membre du comité d'organisation.

Mes interventions se sont déroulées sur des plateformes issues d'un transfert des activités de recherche présentées dans la section suivante (découverte de la micromanipulation, préhension par adhésion et mise en œuvre d'actionneurs piézoélectriques pour la micromanipulation robotisée).

7.3.2/ CRÉATION DE NOUVEAUX MODULES D'ENSEIGNEMENT

De part mes activités de recherche, j'ai été impliqué dans la création de plusieurs modules d'enseignements dans lesquels j'interviens également et dont le contenu est adossé à la recherche. Mes principales contributions sont relatives aux modules suivants (les heures indiquées sont celles que j'effectue) :

- module "**Micromécatronique et microsystèmes**" en première année du master mécatronique et microsystème de l'Université de Franche-Comté (10h de cours, 5h de TD, 8h de TP) : ce module créé en 2006 permet d'aborder les matériaux actifs, les structures compliantes actionnées, les problématiques de la micromanipulation et du micro-assemblage, plusieurs exemples de systèmes micromécatroniques et des technologies de microfabrication hors salle blanche. Les TP sont réalisés sur des plateformes expérimentales issues des activités de recherche : étude des matériaux piézoélectriques et alliages à mémoire de forme.
- module "**Microrobotique**" en seconde année du master mécatronique et microsystème de l'Université de Franche-Comté (2h de cours, 2h de TD, 4h de TP) : ce module créé en 2012 permet d'étudier les spécificités de l'échelle micrométrique pour des problématiques de commande robotique (étalonnage et commande hybride force-position). La plateforme expérimentale de TP est issue d'un transfert des activités de recherche : principe de mesure par vision à très haut rapport plage/résolution de mesure pour l'étude des défauts de positionnement d'un porteur microrobotique $XY\Theta$.
- module "**Procédés de fabrication innovants**" de l'ENSM - École Nationale Supérieure de

Mécanique et des Microtechniques - (2h de cours, 2h de TD, 9h de TP). Ce module permet d'aborder la fabrication de composants miniatures par micro-assemblage robotisé, dans un esprit de micro-usine. Trois travaux pratiques sont proposés : micromanipulation par capillarité (Voir Figure 7.2-a), micromanipulation automatisée par retour visuel (Voir Figure 7.2-b), préhenseur actionné par matériau piézoélectrique (issu d'un transfert des activités recherche).

7.3.3/ TRANSFERT DE PLATEFORMES EXPÉRIMENTALES

Mes activités de recherche ont conduit au développement de plusieurs plateformes expérimentales permettant l'étude de phénomènes ou de comportements, ainsi que la validation expérimentale de modèles ou de commandes. Une fois, certains travaux de recherche aboutis, nous avons trouvé intéressant de continuer à en exploiter certains à des fins pédagogiques, afin que les étudiants puissent mettre en évidence eux-mêmes certains phénomènes ou outils intéressants pour leur cursus ou leur futur métier. La souplesse des formations de l'université nous a notamment permis de réaliser ce transfert de manière progressive et ainsi converger rapidement vers des plateformes pédagogiques adaptées à des travaux pratiques ou projets d'enseignement. En effet, tous les étudiants doivent, par exemple, être capables de maîtriser et d'utiliser correctement une plateforme dans un temps imparti très court afin que les objectifs définis puissent être atteints.

Le transfert progressif des plateformes a généralement fait l'objet des principales étapes suivantes :

- des discussions ont lieu pour définir l'intérêt pédagogique d'une plateforme et ainsi statuer sur son sort (module où elle sera utilisée, objectif pédagogique visé, délais...);
- la plateforme de recherche est ensuite modifiée (aussi bien sur les aspects matériels que logiciels) afin qu'elle puisse être prise en main assez rapidement par les étudiants. Ces modifications se font sur la base des objectifs prédéfinis;
- la plateforme est utilisée en situation réelle préférentiellement dans un cadre pédagogique "par projet" qui présente de nombreux intérêts à ce stade;
- à l'issue des premières utilisations, un bilan est réalisé par l'équipe pédagogique conduisant le plus souvent à engendrer des évolutions de la plateforme et pouvoir ainsi l'insérer dans des rotations de Travaux Pratiques;
- une recherche de financement est réalisée afin d'assurer les évolutions ou un dédoublement de certains matériels critiques (utilisation délicate, matériel fragile ou très utilisé pour la recherche).

Les plateformes ainsi transférées sont, pour la majorité, utilisées dans le cadre de modules directement liés aux activités de recherche du département AS2M. A ce titre, elles contribuent à informer les étudiants sur les activités de recherche menées, et conduisent certains à s'orienter dans la voie de la recherche en candidatant à des stages et thèses proposées. Ce type d'insertion ne concerne qu'une partie des étudiants, ainsi nous veillons à ce que les plateformes développées puissent comporter un double objectif pédagogique, d'une part proposer un contenu qui apporte des compétences métiers "génériques" c'est-à-dire sur la base des activités de recherche mais pas à destination de celles-ci et, d'autre part, un contenu plus spécifique à ces activités de recherche directement à leur destination. Nous pouvons prendre comme exemple l'étude des matériaux piézoélectriques dont la plateforme transférée permet d'étudier différentes structures de commande. Parmi elles, nous trouvons des commandes en boucle ouverte dont certaines

sont largement répandues industriellement et d'autres plus dédiées aux spécificités du matériau utilisé ou de la structure étudiée (par exemple, un doigt de micropince). De même, ces matériaux sont largement répandus et une connaissance de leurs spécificités est utile à de nombreux métiers dans le domaine de la mécatronique. Sur cette base, une connaissance plus fine est couverte par nos domaines de recherche.

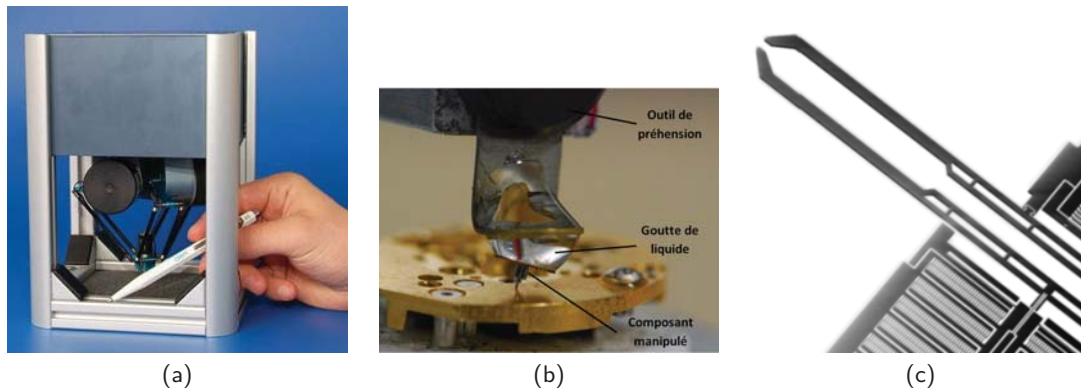


FIGURE 7.2 – Trois supports de TP : (a) Pick and place automatisé par commande référencée vision de microcomposants (b) Préhension de composant par capillarité (c) Commande robuste d'un micropince.

Notons que d'autres plateformes sont également utilisées dans des modules d'enseignement liés aux activités de recherche. Nous pouvons en ce sens citer les trois TP suivants :

- le robot parallèle miniature Pocket Delta de la société Asyrl, présenté Fig. 7.2(a), est doté d'un préhenseur à dépression et d'une caméra permettant de mettre en œuvre des cycles automatisés de prise et dépose de microcomposants, d'effectuer l'étalonnage de la caméra, de quantifier l'exactitude après dépôt d'un microcomposant avec l'étude de paramètres influent ;
- un robot de précision de la société Mitsubishi, présenté Fig. 7.2(b), est doté d'un préhenseur particulier puisqu'il maintient une goutte de liquide. Cet outil permet de mettre en œuvre une technique de préhension spécifique à l'échelle micrométrique puisqu'elle exploite les forces capillaires. Le TP proposé permet d'étudier la faisabilité d'une telle approche ainsi que les paramètres influents ;
- une micropince de la société Femtotools, présentée Fig. 7.2(c), est un microsystème composé de deux doigts de serrage : l'un équipé d'un actionneur capacitif, l'autre d'un capteur de force capacitif. Cette micropince est utilisée pour étudier des modèles de comportement et expérimenter différentes lois de commande notamment robuste compte-tenu de l'influence de l'environnement.

7.3.3.1/ ÉTUDE ET COMMANDE D'UN ACTIONNEUR UNIMORPHE PIÉZOÉLECTRIQUE

La première plateforme porte sur l'étude et la commande de matériaux piézoélectriques à travers un actionneur unimorphe piézoélectrique choisi comme cas d'étude utile dans les contextes des MEMS ou de la micromanipulation par exemple. La Figure 7.3 présente la plateforme développée constituée de l'unimorphe, d'un capteur laser permettant de mesurer la déflexion de son extrémité, d'un amplificateur haute tension, d'un ordinateur associé à une carte d'acquisition de type DSpace et d'une caméra de visualisation ainsi que d'un jeu de masses calibrées.

Cette plateforme permet d'étudier progressivement les différents points suivants :

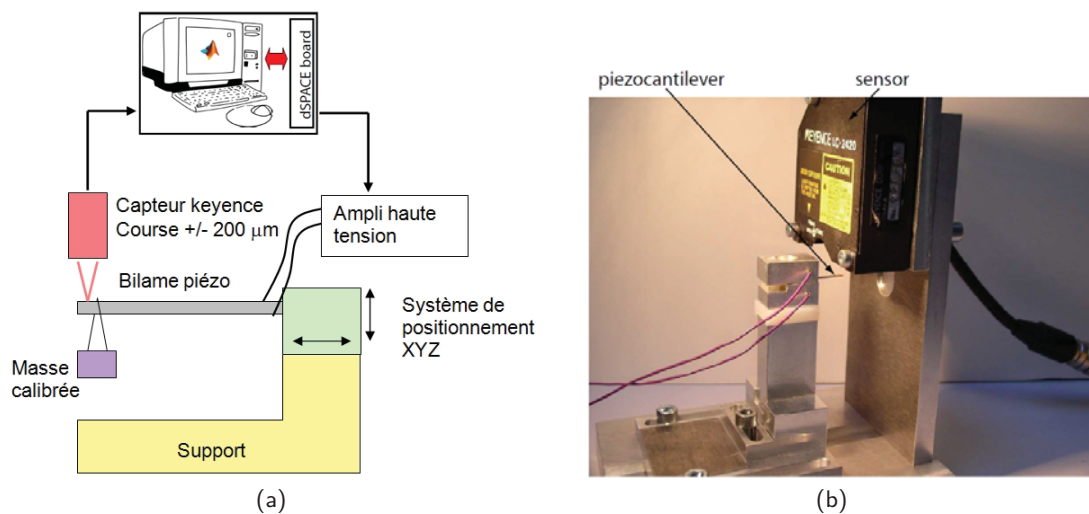


FIGURE 7.3 – Plateforme expérimentale permettant l'étude d'un unimorphe piézoélectrique.

- découverte des spécificités et caractéristiques du matériau : effet direct et inverse, non-linéarités (hystérésis, dérive), dynamique, influence de l'environnement (température, vibrations) ;
- modélisation du comportement dynamique (transfert tension/déplacement) ;
- commande en boucle ouverte en utilisant, par exemple, une approche par "Input Shaping" [Singh and Singhose, 2002] ;
- commande en boucle fermée : PID et commandes robustes.

Cette plateforme a été initialement mise en œuvre pour un module intitulé "Micromécatronique et Microsystems" (première année du master mécatronique et microsysteme). Compte-tenu des différents contenus que cette plateforme peut adresser, son utilisation a ensuite été étendue à d'autres modules intitulés "Commande avancée" et "Usine intégrée" (seconde année du master mécatronique et microsysteme), ainsi que pour le module "Procédés de fabrication innovants" de l'ENSMM.

7.3.3.2/ ÉTUDE ET MODÉLISATION DES AMF

Une plateforme permettant l'étude et la modélisation des AMF (Alliages à Mémoire de Forme) a également été réalisée. Ce matériau est utilisé dans de nombreux domaines applicatifs et présente de nombreuses caractéristiques spécifiques intéressantes compte-tenu de son caractère multi-physique (transduction électrique-thermique-mécanique) et des changements de phase qu'il permet. La Figure 7.4 présente la plateforme constituée d'un fil d'AMF suspendu à une platine, une masse suspendue à celui-ci et un thermocouple mesurant sa température. Cette plateforme permet d'observer et de comprendre les différents changements de phase et les étapes d'un cycle complet d'allongement-contraction. Les changements de phase (austénite à martensite et inversement) sont notamment étudiés à travers les variations de résistivité et de température du fil. L'interfaçage de la plateforme avec un ordinateur et une carte DSpace permet de confronter des résultats expérimentaux à des modèles (statique et dynamique) et également de générer des commandes.

Cette plateforme a été conçue dans le cadre du module "Micromécatronique et Microsystems" (première année du master mécatronique et microsysteme) pour lequel elle est exclusivement

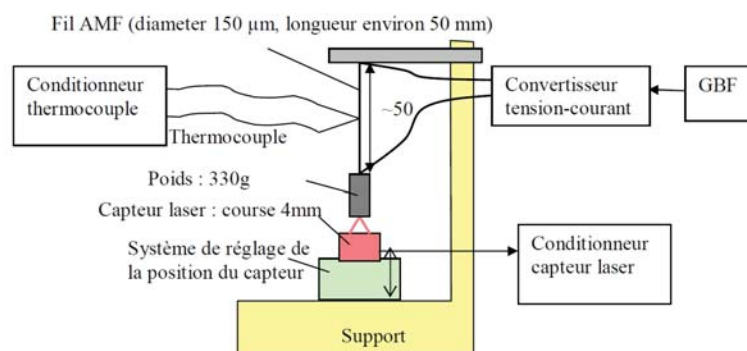


FIGURE 7.4 – Plateforme expérimentale permettant l'étude des AMF.

utilisée. En effet, si l'usage des AMF est particulièrement répandu, son utilisation à l'échelle micrométrique s'est fortement amenuisée depuis quelques années au profit d'autres matériaux actifs plus faciles à commander et à fabriquer.

7.3.3.3/ ETUDE ET ÉTALONNAGE D'UN SYSTÈME DE MICROPOSITIONNEMENT

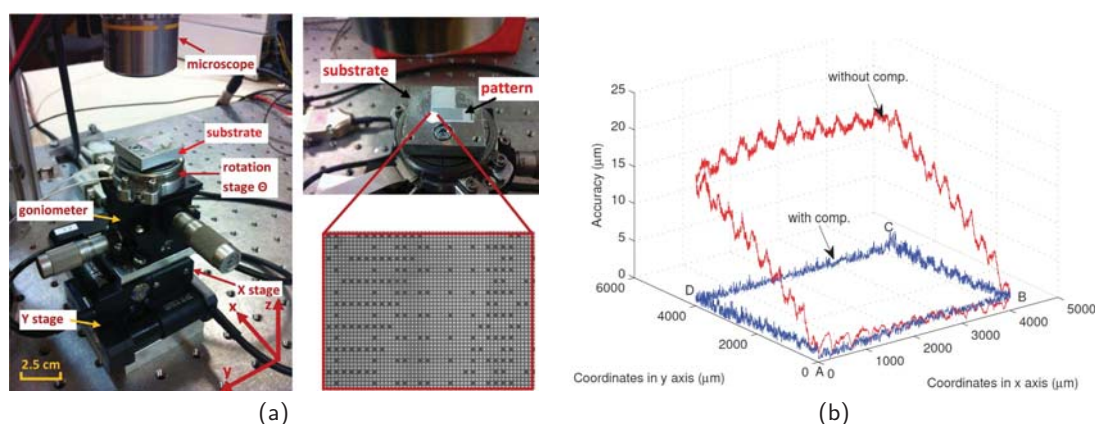


FIGURE 7.5 – Plateforme d'étude et d'étalonnage d'un système de micropositionnement XY (a) la plateforme expérimentale incluant une caméra et une mire Pseudo-Périodique (b) exactitude mesurée pour une trajectoire carrée.

Les travaux présentés dans le chapitre 4 ont également permis de transférer une plateforme issue des activités de recherche vers l'enseignement. Cette plateforme, présentée par la Figure 7.5 couple deux résultats de recherche :

- l'exploitation du principe de mesure par vision et mires codées ;
- l'étude d'un système de micropositionnement XY.

Concernant son principe de mesure, son originalité et ses très bonnes performances, qu'il induit en regard de la littérature, le rendent très intéressant dans le cadre d'un module adossé à la recherche. La première étape du TP consiste à présenter ce principe aux étudiants et est associé à une documentation technique visant à la compréhension du principe général. Les étudiants disposent ainsi d'un moyen de mesure dans le plan et de rapport plage/résolution adapté. Cela permet d'étudier simultanément le défaut de perpendicularité entre les axes X et Y ainsi que les défauts dépendants de la position. La seconde étape du TP consiste à réaliser

des mesures et ainsi d'observer le comportement du système de micropositionnement. Les deux types de défaut pré-cités peuvent être observés sur la Figure 7.5(b), qui est un résultat de mesure typique obtenu. Les mesures réalisées sont utilisées pour identifier le défaut de perpendicularité. La dernière étape du TP consiste à compenser ce dernier afin d'améliorer l'exactitude du système.

Cette plateforme permet ainsi d'étudier un système de micropositionnement, d'en comprendre une partie du comportement, de quantifier ses performances et de les exprimer selon la norme ISO 9283, ainsi que de mettre en œuvre son étalonnage. Elle a été récemment conçue dans le cadre du module "microrobotique" (module optionnel de la seconde année du master mécatronique et microsystème).

7.4/ CONCLUSION

Ce chapitre a permis de présenter différentes actions de transfert de résultats de recherche à destination du milieu industriel ou de l'enseignement. C'est ainsi que mes activités ont pu contribuer à la création de la société Percipio Robotics en 2010 et à des activités de prématuration en vue d'en créer une seconde. J'ai aussi pu faire évoluer le contenu de formations adossées à la recherche en créant de nouveaux contenus pédagogiques (cours, travaux dirigés et travaux pratiques sur la base du transfert de plusieurs plateformes expérimentales).

Ces activités de transfert assurent la synergie entre celles de recherche, celles d'enseignement et celles de transfert industriel. Elles permettent, à ce titre, de contribuer à l'évolution des formations, du milieu industriel, de leur adéquation nourrissant également la recherche en apportant des compétences pointues (via les étudiants recrutés), ainsi que des problématiques nouvelles ouvertes par les évolutions des marchés industriels.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

8.1/ CONCLUSIONS

Mes travaux ont porté sur l'étude et la réalisation de tâches de micro-assemblage complexes, précises et automatisées. Nous avons choisi de traiter cette problématique en exploitant un principe de préhension à contact et un actionnement par matériau actif pour des raisons d'originalité, de versatilité et de précision. Nous avons simultanément proposé un concept de micro-banc-optique modulaire permettant la réalisation de différents MOEMS par assemblage de composants optiques élémentaires. Ce micro-banc-optique a été utilisé, comme cas d'étude, pendant mes travaux parce qu'il permet de démontrer la capacité de réaliser des tâches de micro-assemblage complexes et précises, mais aussi parce qu'il ouvre la voie à une nouvelle génération de MOEMS.

Les travaux conduits ont dû tenir compte ou exploiter les caractéristiques spécifiques de l'échelle micrométrique considérée : prédominance des forces de surface, dynamiques importantes, sensibilité forte aux variations des paramètres de l'environnement, non-linéarités fortes, incertitudes nombreuses et conséquentes, difficultés technologiques (de mesure, de microfabrication et d'actionnement)... Ces spécificités conduisent à une mauvaise connaissance du comportement des systèmes à l'échelle micrométrique se traduisant par des difficultés de conception, de modélisation (multiplication des hypothèses), de validation expérimentale et de commande. Pour ces raisons, nous avons attaché une attention très importante à la modélisation multiphysique, ainsi qu'à la validation expérimentale. Malgré les difficultés de ces étapes, cela nous a permis de mieux comprendre de nombreux comportements et d'identifier les phénomènes prépondérants.

Les connaissances développées progressivement nous ont conduit à l'étude de trois thématiques scientifiques qui ont contribué à l'objectif global visant à réaliser des micro-assemblages complexes, précis et automatisés. La première thématique consistait à étudier, puis à proposer de nouvelles "briques de base", en particulier de nouveaux principes de mesure (vision associée à des mires codées, capteurs de micro-forces), de nouveaux modes d'actionnement piézoélectriques (PMN-PT et multi-couches à films fins) ou de nouveaux systèmes micromécatroniques intégrés (micropince 4 DDL instrumentée en force, ainsi que plusieurs plateformes compliantes actionnées et instrumentées). L'ensemble de ces travaux a conduit à des caractéristiques et performances particulièrement accrues en regard de la littérature, que ce soit en termes de plage, de résolution, de bande passante, de volume ou de nombre de DDL.

Une seconde thématique scientifique a porté sur l'étude des porteurs robotiques utilisés en micro-assemblage. La proposition de nouveaux moyens de mesure, à très grand rapport plage/résolution (supérieur à 10^6), et une métrique, adaptée aux spécificités de l'échelle micrométrique, nous ont conduit à l'étude du comportement de ces porteurs et à l'identification

des principaux paramètres affectant leur exactitude. Ces travaux exploitant une approche par étalonnage géométrique ont également permis d'améliorer de manière notable l'exactitude des porteurs robotiques : 35 fois pour les systèmes de micropositionnement (guidages mécaniques à jeu) et 8 fois pour les systèmes de nanopositionnement (guidage par structures compliantes sans jeu).

La troisième thématique a porté sur des problématiques de modélisation et de commande utiles à l'automatisation de tâches de micro-assemblage. Ces travaux ont tout particulièrement porté sur les dynamiques importantes, les nombreuses incertitudes et la prédominance des forces surfaciques inhérentes à l'échelle micrométrique. Ces spécificités nous ont amené à porter une attention particulière aux transitions contacts/non-contacts notamment sujettes à des effets de collage (en raison des forces de pull-off) et induisant des réponses libres très oscillantes (sources d'instabilités). Pour traiter ces aspects, nous avons proposé un modèle dynamique non-linéaire du préhenseur intégré et instrumenté en force ainsi qu'une commande dynamique robuste par approche hybride force-position. Celle-ci a conduit à la réalisation de tâches de micro-assemblage complexes, rapides et automatisées.

D'un point de vue général, les travaux conduits ont contribué à assoir l'approche de micro-assemblage robotisé par préhenseur actif. Ils permettent, aujourd'hui, de réaliser une très grande diversité de tâches robotiques, de réaliser des tâches particulièrement complexes et précises, mais également de les automatiser par différentes approches. Ces résultats ouvrent de nombreuses perspectives, comme la possibilité de réaliser une nouvelle génération de systèmes miniatures assemblés, ce qui s'avère particulièrement intéressant pour des domaines, tels que la micromécanique, l'instrumentation et la chirurgie endoscopique.

Outre ces problématiques de micro-assemblage, les travaux réalisés ont surtout permis une amélioration notable de la compréhension des comportements et des phénomènes en jeu à l'échelle micrométrique. Les différentes briques de base technologiques innovantes issues de cette compréhension possèdent un potentiel applicatif important pour de nombreux domaines et contribueront certainement à l'avènement d'une nouvelle génération de microrobots et de systèmes micromécatroniques.

Enfin, mes activités de recherche présentées dans ce document se sont déroulées dans un contexte plus général de synergie enseignement-recherche-transfert industriel fructueuse. Ils ont contribué à ce titre à la création de la société Percipio-Robotics, à la pré-maturation en vue de créer une seconde entreprise, au transfert de plateformes expérimentales de la recherche vers l'enseignement, ainsi qu'à la création de nouveaux modules d'enseignement pour plusieurs formations adossées à la recherche.

8.2/ PERSPECTIVES

Cette section explicite quatre perspectives de mes activités de recherche, qui, je l'espère, pourront faire l'objet de travaux futurs. Pour chacune d'entre elles, le contexte et les enjeux sont présentés et conduisent à des problématiques scientifiques, qui sont explicitées. Certaines de ces perspectives recensent des applications potentielles. Ces applications ont été identifiées à travers différentes réflexions et échanges et sont plutôt données à titre d'exemples illustratifs. Ce type de réflexion est important pour la recherche ultérieure de supports de financements, pour des problématiques de transfert industriel ou plus largement pour permettre une synergie avec d'autres collègues, des partenaires d'autres établissements avec des thématiques proches ou complémentaires.

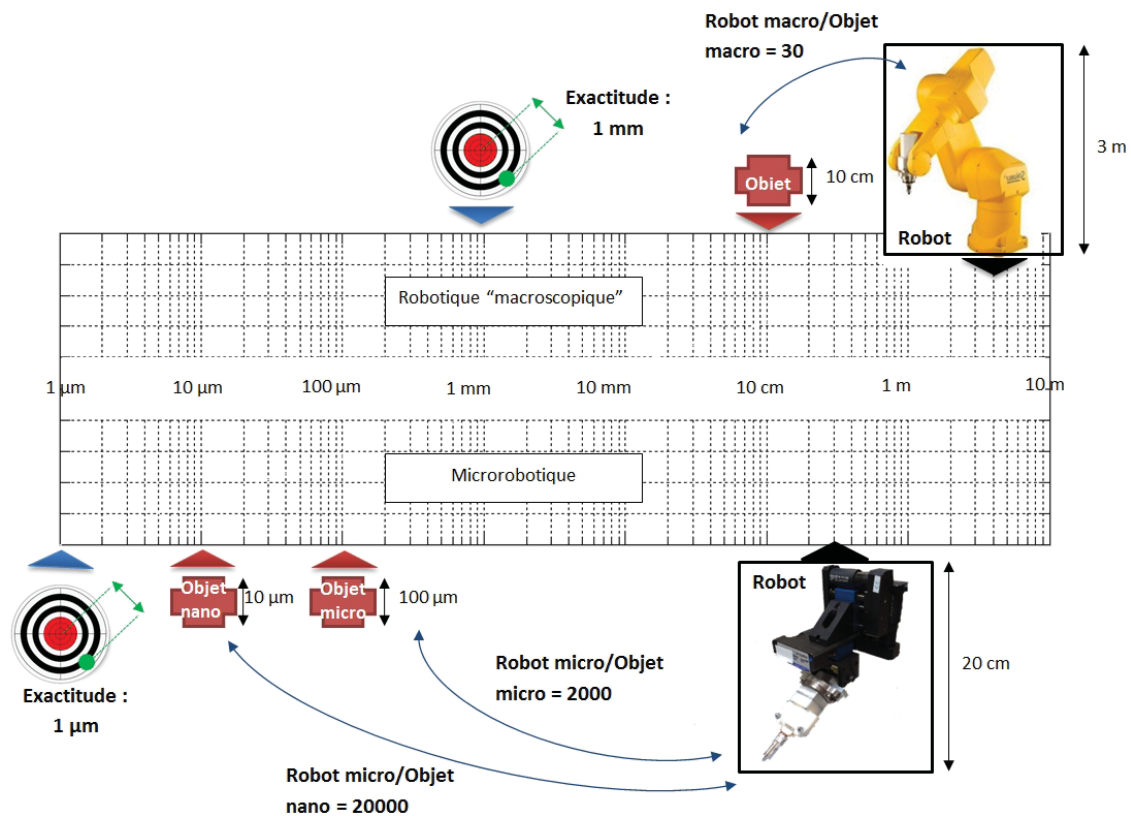


FIGURE 8.1 – Comparaison des dimensions (robot/objet) entre la robotique "macroscopique" et la microrobotique.

8.2.1/ SYSTÈMES MICROROBOTIQUES COMPACTS ET INTÉGRÉS

Contexte et enjeux

Les travaux présentés dans ce manuscrit, ainsi que de nombreux autres de la littérature, montrent la difficulté extrême d'effectuer des tâches de micromanipulation ou de micropositionnement précises (au sens de l'exactitude). Au delà de toutes les études déjà effectuées, qu'elles soient de nature technologiques ou méthodologiques, cette difficulté peut s'expliquer, en partie, par le rapport entre les dimensions relatives d'un robot et celles du composant qu'il manipule (voir Figure 8.1) :

- pour l'échelle macroscopique : le rapport dimensions du robot / dimensions du composant manipulé est d'environ 30 (un robot de 3 m de hauteur manipule des composants d'environ 10 cm de côté) pour une exactitude millimétrique ;
- pour l'échelle micrométrique : ce rapport est d'environ $2\,000$ (un robot de 20 cm manipule des composants d'environ $100 \mu\text{m}$ de côté) pour une exactitude de pose micrométrique ;
- si on se projette sur l'assemblage de composants nanophotoniques par plateformes de micro-assemblage, le rapport sera d'environ $20\,000$ (un robot de 20 cm manipule des composants d'environ $10 \mu\text{m}$ de côté).

Ces chiffres permettent de constater, qu'à l'échelle micrométrique, les robots utilisés sont extrêmement grands en rapport avec leurs homologues macroscopiques. Effectuer une tâche de micro-assemblage revient, en faisant une pure homothétie, à manipuler à l'échelle macroscopique des composants de 10 cm avec un robot de 200 m de haut. Effectuer une tâche d'assem-

blage de composants nanophotoniques, reviendrait à manipuler un composant de 10 cm avec un robot de 2 km de haut. Assurer une exactitude de pose millimétrique dans ces conditions devient particulièrement exigeant.

Ce constat est simpliste car il repose sur une homothétie sans considérer les effets d'échelle. Cependant, il explique probablement en grande partie l'influence importante de certains facteurs comme la sensibilité à l'environnement. Le déplacement d'un objet de masse quasiment négligeable est effectué par un robot de masse extrêmement importante. Ce rapport particulièrement défavorable à l'échelle micrométrique est également néfaste à plusieurs points de vue : en termes énergétique, en termes de précision de positionnement ainsi qu'en termes de dynamique. Cela nous conduit aujourd'hui à penser qu'un des verrous majeurs des microtechnologies et de la microrobotique, réside dans le développement d'une nouvelle génération de robots dont les dimensions seraient millimétriques.

Problématiques scientifiques

De nombreux travaux exploitent une approche par auto-assemblage consistant à créer des champs de force à distance pour déplacer une particule dans l'espace. L'approche que nous proposons vise à créer une alternative en créant des structures robotiques de dimensions millimétriques comportant principalement une structure passive déformable et un ou plusieurs actionneurs répartis ou distribués.

De prime abord, face à l'ensemble des difficultés rencontrées à l'échelle micrométrique, les solutions conduisant au développement de robots de dimensions millimétriques ne semblent pas triviales. Cependant, une partie des travaux que j'ai conduit, ont engendré, en quelques années, une évolution notable. Nous sommes en effet passés de préhenseurs frustrés montés sur des porteurs de cinématique complexe à des préhenseurs dextres multi-DDL montés sur des porteurs frustrés. Cette évolution illustre le besoin de robots plus compacts : une micropince dextre devenant progressivement le robot lui-même.

Malgré cette tendance qui semble s'amorcer depuis plusieurs années, les dimensions des systèmes étudiés sont, aujourd'hui, de l'ordre d'une dizaine de mm (la micropince 6DDL mesure, par exemple, 20 mm de longueur) et des efforts conséquents restent encore à faire pour obtenir des robots millimétriques.

L'approche consistant à associer une structure mécanique particulièrement souple à un ou plusieurs actionneurs, constitue une alternative prometteuse. La structure mécanique souple peut ainsi être monolithique ou assemblée. L'actionnement, peut quant à lui être localisé ou réparti. Les différentes technologies d'actionnement innovantes développées par les travaux que j'ai encadré (PMN-PT et piézo multi-couches à film épais) ou par d'autres travaux (polymères électro-actifs par exemple) constitueront des principes de choix. Plusieurs technologies pourront être mises en œuvre voire combinées : les technologies de microfabrication en salle blanche, des techniques de prototypage rapide et les moyens de micro-assemblage. Concernant les technologies de prototypage rapide, deux solutions sont actuellement disponibles : les systèmes de l'entreprise nanoscribe pour la réalisation de composants passifs de dimensions inférieures à environ $10\text{ }\mu\text{m}$ et les systèmes concurrents plutôt adaptés à la fabrication de composants de dimensions supérieures au millimètre. Il existe donc un gap non couvert entre ces deux principales technologies constituant un domaine à explorer.

Ce positionnement conduit à l'étude de plusieurs problématiques. Tout d'abord, les structures mécaniques réalisées viseront à engendrer des déformations particulièrement grandes et devront considérer les aspects dynamiques particulièrement prépondérants à l'échelle micrométrique. La modélisation du comportement de telles structures constituera une étape clé. L'utilisation

de méthodes unifiées pour la conception et la commande optimales et robustes permettront de prendre en compte des problématiques de commande dès la conception [Grossard et al., 2009, Khadraoui et al., 2014, Mouhib et al., 2009, Bideaux et al., 2003]). Les travaux réalisés à ce jour, relatifs à l'échelle micrométrique, concernent des problématiques planaires, des structures monolithiques et de dimensions de quelques dizaines de millimètres. Des efforts importants restent donc à effectuer pour permettre la modélisation de structures 3D, millimétriques et non-monolithiques.

Enfin, l'étude de systèmes microrobotiques millimétriques pourra induire de nouveaux principes. Par exemple, nous avons utilisé le PMN-PT pour son couplage électro-mécanique. D'autres travaux étudient, par exemple, ses couplages électro-optiques. L'exploitation, simultanée des propriétés électro-opto-mécaniques d'un tel matériau, semble particulièrement séduisante dans ce contexte de systèmes extrêmement complexes et miniatures.

Applications

Différents domaines applicatifs pourront bénéficier de systèmes microrobotiques compacts, intégrés et de dimensions millimétriques. Tout d'abord, des efforts importants sont en train d'être faits pour développer des outils mini-invasifs, voire non-invasifs, que ce soit pour le diagnostic ou pour la chirurgie intra-corporelle. Différents résultats montrent, que l'approche robotique miniature permet de réaliser des opérations de bien meilleure qualité, moins traumatisantes, engendrant moins de séquelles et moins de risques post-opératoires. Les travaux, en cours, portent sur la réalisation d'opérations dans des zones du corps, qui restent proches des orifices naturels (typiquement à moins de 20 cm) principalement pour des raisons dimensionnelles liées à la difficulté de miniaturisation d'outils existants. Le développement de robots de dimensions millimétriques peut tout à fait conduire à la création de nouveaux outils chirurgicaux et ouvrirait inévitablement de nouvelles fonctions capables de réaliser de nouvelles tâches opératoires par approche robotisée.

Ces systèmes microrobotiques compacts permettraient également de réaliser une nouvelle génération de systèmes d'assemblage et d'ajouter des fonctions à des systèmes miniatures existants comme des drones miniatures. Des discussions ont conduit à un projet actuellement en cours de montage relatif à cette application.

8.2.2/ MICRO-ASSEMBLAGE HAUTE CADENCE

Contexte et enjeux

Les travaux, que j'ai conduit, ont permis la réalisation d'assemblages complexes et automatisés par différentes approches engendrant des durées de cycles d'assemblage différentes : 30 min en mode téléopéré, 30 s en mode automatisé par asservissement visuel et moins d'une seconde en mode automatisé par commande dynamique hybride force-position. Ce dernier résultat peut être comparé aux travaux d'Avci publiés en 2015, qui ont conduit à la manipulation automatisée de composants plus simples (billes de dimensions inférieures à 100 μm) par asservissement visuel avec un temps de cycle d'une seconde [Avci et al., 2015]. Ces deux résultats montrent que l'état de l'art relatif au critère de temps de cycle se situe autour d'une seconde.

L'augmentation des cadences de micro-assemblage possède deux intérêts majeurs : (1) l'intérêt industriel pour augmenter la productivité qui constitue un des enjeux industriels actuels majeurs (2) l'intérêt scientifique induit par cette perspective. D'un point de vue industriel, le temps de cycle actuel d'une seconde peut directement être comparé avec celui obtenu par des machines utilisées en microélectronique qui ont des cycles de prise-dépose de composants

simples (prismatiques) de dimensions supérieures à $200\text{ }\mu\text{m}$, mais avec des cadences de l'ordre de 10 cycles par seconde. Ces chiffres semblent constituer une limite à ce type de machines. Le gap très important s'explique en grande partie par l'emploi de machines dédiées réalisant des tâches très simples et reposant sur un modèle économique tout à fait différent (machines très coûteuses permettant des conceptions particulièrement optimisées).

Outre ce point, nous avons vu que la réduction d'échelle engendre des dynamiques plus importantes. Par exemple, la bande passante de la micropince piézoélectrique dont les doigts mesurent 15 mm de long est de l'ordre du Kilo-Hertz. Les préhenseurs ou les systèmes microrobotiques compacts possèdent de très bonnes caractéristiques dynamiques, que nous n'exploitons actuellement pas. L'objectif des travaux proposés ici est d'exploiter ce potentiel et devrait permettre une réduction importante des temps de cycle obtenus actuellement (1 cycle par seconde).

Problématiques scientifiques

Malgré le potentiel dynamique des systèmes microrobotiques, la réalisation effective de temps de cycles plus courts repose sur plusieurs verrous.

Le premier d'entre eux est relatif aux transitions contacts/non-contacts. Elles nécessitent des stratégies spécifiques à l'échelle micrométrique, ainsi que des structures de commandes capables de basculer rapidement entre plusieurs types de commandes. La réduction des temps de cycle nécessiterait un très bon contrôle de ces contacts, mais fait surtout apparaître des risques d'instabilités et ce pour plusieurs raisons :

- la nature collante (force de pull-off prédominante) des contacts nécessite des stratégies spécifiques et engendre une réponse libre particulièrement oscillante lors de la rupture des contacts ;
- les sources d'incertitudes sont nombreuses et très influentes ;
- les difficultés de maîtriser les changements de commande ;
- les limites dynamiques des capteurs (vision notamment) et de l'ensemble des boucles de commande.

Augmenter la cadence de micro-assemblage passe par des travaux spécifiques relatifs à la commande. Il serait, en ce sens particulièrement, intéressant d'exploiter les différents modèles multi-physiques obtenus par les travaux, que j'ai conduit (comme le modèle dynamique de la micropince piézoélectrique). L'utilisation de cette approche multi-physique permet une connaissance, du comportement des systèmes qui s'avèrera clé pour définir une structure de commande adaptée et robuste. Nous menons actuellement des travaux préliminaires en ce sens exploitant le formalisme de systèmes port-hamiltoniens. Celui-ci permet une modélisation multi-physique des systèmes, de déduire une structure de commande adaptée, ainsi que d'étudier les conditions de stabilité.

Chercher à exploiter le potentiel dynamique des systèmes microrobotiques vise également à exploiter des stratégies de manipulation ou d'assemblage originales et constitue un second verrou. Il serait, par exemple, très intéressant d'étudier des stratégies fondées sur le lancer des micro-objets. De telles stratégies reposent sur l'exploitation de commandes particulièrement dynamiques, de capteurs ultra-rapides, mais également sur la maîtrise des trajectoires des composants après leur lâcher. Il serait alors possible de déplacer un composant en le lançant. Il est aussi envisageable de rattraper le composant en cours de trajectoire afin de générer un déplacement relatif du composant par rapport à son préhenseur. Ainsi, plusieurs cycles élémentaires permettraient de générer des déplacements importants (théoriquement infinis) et donc bien supérieurs à l'amplitude des déplacements des doigts de préhenseur (il s'agirait ici

d'une forme de principe stick-slip). Un tel concept pourrait aussi être associé à des principes d'actionnement à distance qui créerait des lignes de champs contribuant à guider la trajectoire du composant lancé.

8.2.3/ ASSEMBLAGE DE COMPOSANTS NANOPHOTONIQUES

Contexte et enjeux

Un troisième vecteur de perspectives des travaux que j'ai conduit est orienté vers l'assemblage de composants de dimensions plus petites à ceux étudiés jusqu'ici. La cible visée est typiquement des composants de géométries simples ou complexes et dont toutes les dimensions sont inférieures à $20\text{ }\mu\text{m}$. Cet objectif dimensionnel se justifie pour deux raisons principales :

- en premier lieu, l'échelle dimensionnelle visée se situe dans un gap où il n'existe que très peu de moyens capables de réaliser des tâches précises et complexes. Des "physiciens" utilisent des outils de type pointe pour manipuler des composants de dimensions inférieures à $10\text{ }\mu\text{m}$. Leurs travaux se situent sur une échelle dimensionnelle inférieure à celle visée et ceux-ci sont relativement qualitatifs (du point de vue de l'assemblage) notamment parce qu'ils exploitent des principes de préhension frustrés (typiquement une pointe). Les microroboticiens, quant à eux, ont beaucoup étudié l'échelle dimensionnelle des composants supérieurs à $100\text{ }\mu\text{m}$;
- le second point important est que le domaine de la nanophotonique est particulièrement actif scientifiquement, de nombreuses applications industrielles sont accessibles. La possibilité de réaliser des composants nanophotoniques hybrides par assemblage nourrit de très nombreuses ouvertures particulièrement originales et, enfin, les dimensions des composants faisant objet des réflexions sont typiquement de l'ordre dimensionnel visé.

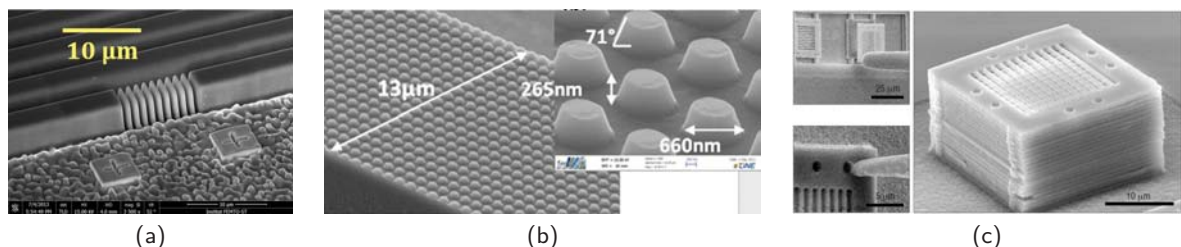


FIGURE 8.2 – Composants nanophotoniques : (a) Réseau de Bragg à facteur de forme géant obtenu en usinant le flanc du ridge : le faisceau optique est guidé puis passe à travers le réseau de 9 lamelles (b) Lamelle structurée par des plots (c) Composant photonique résultant de l'assemblage de 20 lamelles structurées [Aoki, 2003]

La réalisation de composants photoniques complexes exploite des technologies de microfabrication en salle blanche, et conduit majoritairement à des systèmes monolithiques, où le faisceau lumineux se propage uniquement dans la matière. Certaines équipes commencent à exploiter la propagation des faisceaux en champ libre (dans l'air ou le vide, voir Figure 8.2(a)) afin d'exploiter de nouveaux modes d'exhalation de la lumière, qui se traduisent par de nouvelles fonctionnalités ou des performances accrues. L'objectif du nouvel axe scientifique proposé ici, est d'assembler des composants nanophotoniques de dimensions maximales de l'ordre de $10\text{ }\mu\text{m}$ et visant à réaliser des systèmes où le faisceau lumineux se propagera dans l'air. Cette approche a fait l'objet d'une preuve de concept particulièrement intéressante à travers la réalisation d'un multi-couche [Aoki, 2003]. Ces travaux ont montré qu'une limite importante de cette approche réside dans l'épaisseur du film d'air (appelé lame d'air) entre deux composants qui ne sont pas

en contact qui est source de pertes optiques conséquentes. Le préhenseur utilisé est une pointe passive, qui exploite les effets d'adhésion par contact planaire. Cela nécessite de réserver une zone plane sur le composant à manipuler. Ce choix de préhenseur limite considérablement le type de composants manipulables ainsi que la diversité des tâches réalisables.

Nous proposons d'utiliser une approche par micropince malgré les dimensions très petites visées. Cette approche apportera une versatilité et une capacité à réaliser des tâches complexes uniques. Il sera, par exemple, possible de contrôler les forces de contact et d'assembler deux composants en minimisant la lame d'air. Il sera également possible d'insérer une lamelle structurée dans une rainure, ou de réaliser des empilements de plusieurs lamelles accolées (idée du réseau de Bragg présentée en Figure 8.2 sans avoir de lame d'air).

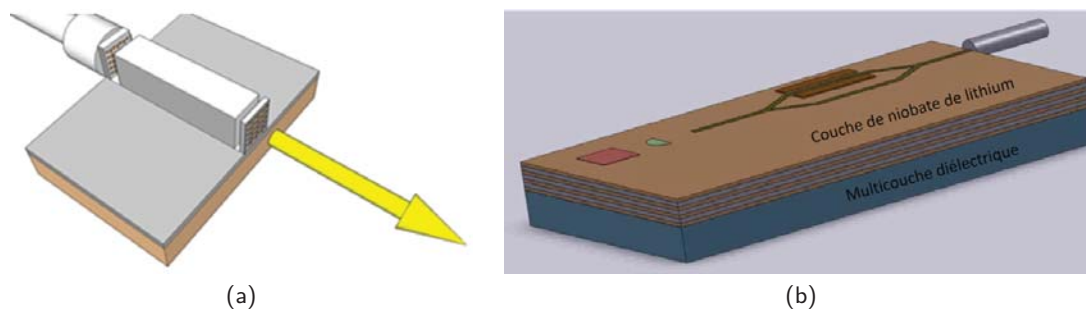


FIGURE 8.3 – (a) Concept de structure photonique hybride intégrant une lamelle photonique structurée insérée dans un guide d'onde par assemblage (b) Ajout d'une lamelle photonique en Niobate de Lithium sur un système multicouche optique.

Ces travaux ont débuté par une collaboration avec le département d'optique de Femto-ST (notamment Nadège Courjal et Maria Pilar) et font l'objet du projet Nano-ROBOPTIC que je coordonne. Ce projet débuté en octobre 2015 supporte le financement de la thèse de Houari Bettahar, dont le co-encadrement est partagé entre les deux départements de recherche. Deux architectures photoniques ont particulièrement retenu notre attention et feront l'objet d'études à venir : une première architecture où une lamelle va être assemblée perpendiculairement à l'axe optique (voir Figure 8.3(a)). Celle-ci permet de structurer une lamelle (voir Figure 8.2(b)), puis de l'insérer en bout de guide ou dans une rainure transversale à ce guide. La seconde architecture consiste à assembler une lamelle dans l'axe optique conduisant à une structure multi-couche (voir Figure 8.3(b)).

Problématiques scientifiques

L'objectif de cet axe scientifique est d'étudier l'assemblage de composants photoniques, mais également que les systèmes photoniques assemblés résultant puissent avoir des caractéristiques optiques particulièrement innovantes. Ces deux exigences possèdent un verrou commun relatif au modèle mécano-optique du composant photonique, c'est à dire le modèle liant la position relative de deux composants photoniques aux propriétés optiques de l'ensemble.

L'obtention de ce type de modèle est particulièrement complexe puisque, contrairement à l'optique macroscopique, où le comportement d'un système assemblé peut facilement être prévu, l'assemblage de composants photoniques induira des phénomènes optiques, qui ne sont préalablement pas connus. L'approche robotique choisie, ainsi que les travaux préalablement effectués (chapitre 6), permettront d'étudier ce verrou en réalisant des tâches de préhension fines, en générant des trajectoires précises, complexes et en exerçant des forces. Ces travaux conduiront à étudier la problématique de génération de mouvements "ultimes" pour assurer des précisions de positionnement relatives inférieures à 10 nm et ainsi affiner la compréhension du compor-

tement optique. Cette recherche de précision doit faire l'objet de travaux de commande, de traitement de signaux, de considération des différentes sources de bruit mais requiert également de nouveaux systèmes microrobotiques d'assemblage particulièrement compacts (comme cela a été explicité en section 8.2.1). L'approche proposée mettra également en œuvre la mesure des forces de contact, d'une part en raison du facteur de forme très élevé (supérieur à 20) des lamelles à assembler (influence en termes de fragilité et de comportement optique), et, d'autre part pour permettre le contrôle des forces de contact lors des assemblages (pour minimiser les lames d'air).

L'assemblage de composants photoniques en environnement MEB possède également plusieurs intérêts. Naturellement, la visualisation d'un composant pendant son assemblage est bien meilleure en utilisant un MEB qu'un microscope photonique. De même, la chambre à vide d'un MEB, dans laquelle sont effectuées les tâches d'assemblage, offre un environnement particulièrement propre et stable. Au delà de ces points, l'exploitation de modules optionnels ajoutés au MEB ouvre de nombreuses possibilités séduisantes mais également contraignantes. Par exemple, la plateforme -Robotex (plateforme d'excellence ROBOTEX), que nous prévoyons d'utiliser, possède simultanément les outils suivants :

- une structure microrobotique complexe, qui permet de générer des mouvements très précis (visualisation sous un autre angle, assemblage ou usinage 3D) ;
- un FIB (Focus Ion Beam) couplé à un GIS (Gas Injection System) qui permettent l'usinage très précis de lamelles photoniques ou le dépôt localisé de matière.

Cet outil unique combine plusieurs outils complémentaires qui nous permettront de réaliser, dans le même espace, des étapes complexes : structuration de lamelles (ajout ou enlèvement de matière), assemblage de composants, dépôt de matière, étude et caractérisation des couplages mécano-optiques, ainsi que la solidarisation des lamelles fines après leur mise en place.

Ce potentiel très intéressant fait toutefois apparaître des problématiques complexes. Tout d'abord, le niveau de précision recherché requiert l'utilisation de systèmes microrobotiques très précis et compacts (voir section 8.2.1). Le volume disponible pour réaliser l'ensemble de ces tâches in-situ est de quelques millimètres cube. Par ailleurs, l'environnement à vide induit des amortissements extrêmement faibles, ce qui nécessitera des travaux spécifiques pour garantir une réponse amortie [Faria et al., 2015]. Enfin, la réalisation de ces différentes tâches in-situ MEB par l'approche proposée permettra d'utiliser de nouveaux matériaux et d'étudier de nouveaux couplages optiques. Cela nécessitera alors également des travaux pour étudier les processus de fabrication exploitant le MEB-FIB-GIS adaptés à ces matériaux.

Applications

Quelques études récentes font état du potentiel applicatif de composants nanophotoniques assemblés. Par exemple, l'assemblage télé-opéré d'éléments optiques avec mesure simultanée des spectres de transmission a été démontré avec succès pour des systèmes WDM (Wavelength Division Multiplexing) performants [Genevaux et al., 2014]. D'autres applications ont conduit à des dispositifs constitués d'empilement de cristaux photoniques 3D [Ishizaki et al., 2013] ou à la manipulation de nanofils [Sergeyev et al., 2015]. L'approche, que nous proposons, possède un caractère innovant compte-tenu de l'approche robotique utilisée qui permettra de développer des assemblages spécifiques à l'optique intégrée. Il sera aussi possible de proposer des modèles mathématiques intégrant les réponses de mesure de force, mesure spectrale et visuelle pour référencer le positionnement automatique des blocs photoniques. Plusieurs applications précises sont en cours d'étude dans un cadre de collaboration avec des entreprises et font l'objet de demandes de financement en cours. Plus généralement, les composants développés seront

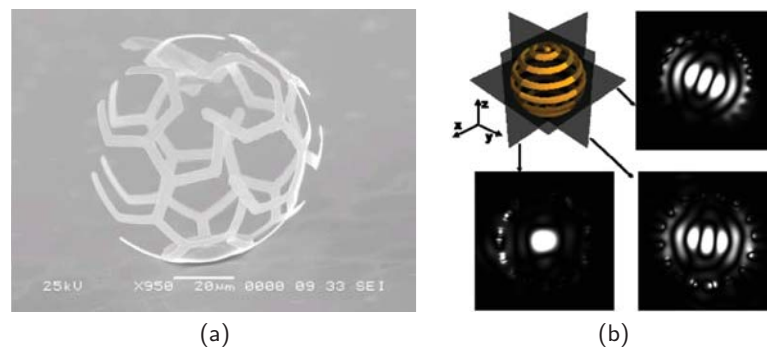


FIGURE 8.4 – Exemple d'origamis microfabriqués permettant de piéger des photons (a) exemple de structure (b) réponse optique d'un piège [Danescu et al., 2015].

adaptables pour des applications dans de nombreux secteurs d'activités tels que le diagnostic biomédical, la santé et les télécommunications.

8.2.4/ ORIGAMIS MICROMÉCATRONIQUES

Contexte et enjeux

L'origami consiste à plier une feuille de papier plane pour réaliser une structure 3D complexe. Ce principe est exploité pour plusieurs échelles dimensionnelles mais s'avère particulièrement adapté au contexte de la microfabrication et de la microrobotique pour différentes raisons :

- les technologies de microfabrication sont particulièrement adaptées à la réalisation de structures planaires. La réalisation de structures 3D constitue, à l'inverse, un verrou extrêmement fort ;
- les technologies de microfabrication permettent la réalisation de structures, dont les articulations sont des liaisons compliantes. Les structures résultantes sont sans jeu et donc capables de bonnes précisions de positionnement ce qui est particulièrement recherché en microrobotique ;
- les déformations très importantes sont possibles à l'échelle micrométrique (facteur d'échelle favorable) ;
- le manque de technologies permettant la réalisation de structures microrobotiques non-compliantes.

La littérature fait état de nombreux travaux conduisant à la réalisation de différentes formes géométriques complexes par origami microfabriqués [Ge et al., 2014, Peraza-Hernandez et al., 2014]. Celles-ci sont constituées de deux ou plusieurs couches fines dont une est pré-contrainte. Différents amincissements localisés constitueront des liaisons déformables lors de l'usinage final qui consiste à relâcher la structure.

Quelques structures ont été réalisées pour créer des fonctions particulières et innovantes comme des cages pour piéger les photons permettant la réalisation de micro-résonateurs [Danescu et al., 2015].

Problématiques scientifiques

Malgré le très grand potentiel des origamis microfabriqués, les travaux effectués conduisent pour l'instant à des structures passives. Des efforts sont actuellement faits pour essayer de modifier leur forme en faisant, par exemple, varier certains paramètres d'environnement (on parle alors

d'origamis 4D). Le contrôle des déformations constitue actuellement un verrou fort compte-tenu des très grandes déformations induites et de la complexité des structures. Un second verrou réside dans la maîtrise des déformations engendrées lors de la libération de la structure. Toute erreur de conception, d'incertitude de fabrication ou de difficultés de prévoir le comportement de la structure induit une étape de reconception suivie d'une nouvelle modélisation, puis d'une nouvelle fabrication. Les procédés de salle blanche étant complexes, le nombre d'itérations réalisable est particulièrement limité (la durée typique d'un cycle conception-réalisation est d'un an).

Face à ce très grand potentiel et compte-tenu de ces deux verrous majeurs, nous proposons d'étudier cette thématique, qui constitue une solution originale pour réaliser des systèmes microrobotiques mentionnés en section 8.2.1. L'approche, que nous proposons, possède plusieurs objectifs :

- réaliser des structures origamis microfabriquées et actionnées, qui conduiraient à des origamis micromécatroniques, une première preuve de concept a été effectuée [Onal et al., 2015]. Pour cela, deux possibilités originales peuvent être étudiées : (1) exploiter les travaux relatifs aux matériaux piézoélectriques multi-couches à film épais que nous avons étudié afin de réaliser des structures monolithiques (2) intégrer un actionneur par micro-assemblage pour réaliser une structure hétérogène ;
- réaliser une bibliothèque d'origamis élémentaires que nous pourrions assembler pour réaliser des structures très diverses et complexes. Cette modularité nous a semblé particulièrement intéressante et réaliste dans le cadre des travaux relatifs aux micro-bancs-optiques.

Outre les aspects technologiques, l'approche proposée réside sur une modélisation particulièrement fine du comportement de chaque brique de base, puis de la structure assemblée. Des modèles complexes ont été proposés dans la littérature pour étudier la déformation des structures (spécifiques à chaque forme géométrique) en mode quasi-statique. Ces travaux nécessitent une modélisation dynamique puisque l'objectif est justement de créer des mobilités et de bénéficier des bandes passantes potentiellement élevées à l'échelle micrométrique.

Ces différents travaux conduiraient à une nouvelle génération d'origamis 5D et permettrait, par ailleurs, le prototypage rapide de systèmes micromécatroniques 3D actionnés de dimensions submillimétriques.

ANNEXE A - CURRICULUM VITÆ

Cédric CLEVY

Né le 16 Septembre 1977

Marié, 2 enfants, Nationalité Française

Institut FEMTO-ST

24 rue Alain Savary, 25000 Besançon

06 69 56 72 35

cclevy@femto-st.fr

<http://members.femto-st.fr/cedric-clevy>

FONCTIONS ET RESPONSABILITÉS ACTUELLES

- Depuis 2006 **Maître de Conférences** en 61^{ème} section à L'Université de Franche-Comté (UFC)
Enseignant, membre du service d'enseignement intitulé GAP (Groupe Automatique et Productique).
Chercheur, membre de l'Institut FEMTO-ST, UMR CNRS 6174 - Département AS2M (Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques) - équipe CODE (COntrol DEsign).
- Depuis 2013 **Responsable** du master SAPIAA* (spécialité de la mention Sciences des Aliments). *Systèmes Automatisés de Production dans les Industries Agro-Alimentaires.
- Depuis 2014 **Co-président** de la commission Compétences et Innovation du Pôle de compétitivité Vitagora. Nommé par l'Université de Franche-Comté pour la représenter.

PARCOURS ANTÉRIEUR

- 2011 CRCT (Congé pour Recherche ou Conversions Thématiques) de 6 mois.
- 2005-2006 ATER (Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche) à l'Université de Franche-Comté au Département d'Automatique. Recherche effectuée au Laboratoire d'Automatique de Besançon.
- 2002-05 Préparation de thèse de doctorat au Laboratoire d'Automatique de Besançon (UMR CNRS 6596), Moniteur à l'université de Franche-Comté.
Thèse en automatique, dirigée par Nicolas Chaillet, soutenue le 11 Décembre 2005 et intitulée *Contribution à la micromanipulation robotisée : un système de changement d'outils automatique pour le micro-assemblage*
- 2002 DEA Informatique, Automatique, Productique de l'Université de Franche-Comté.
DEA Magistère Sciences Mécaniques et Technologiques pour l'Ingénieur de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris VI (2002).
- 1998-2001 Scolarité à l'École Normale Supérieure de Cachan :
2001 : Réussite au concours de l'agrégation externe en génie mécanique.
2000 : Maîtrise de Technologie Mécanique de l'Université Pierre et Marie Curie VI.
1999 : Licence de Technologie Mécanique de l'Université Pierre et Marie Curie VI.

9.1/ ACTIVITÉS DE RECHERCHE

9.1.1/ THÉMATIQUES DE RECHERCHE

Mes activités de recherche ont été conduites au Laboratoire d'Automatique de Besançon (LAB) jusqu'en janvier 2008 date à laquelle le LAB est devenu le département AS2M (Automatique et Systèmes Micro-Mécatroniques) de l'institut FEMTO-ST. Elles consistent globalement en l'étude, la modélisation, le développement et la commande de systèmes microrobotiques et sont plus particulièrement mises en œuvre pour la réalisation de tâches complexes et précises de micro-assemblage.

L'échelle dimensionnelle considérée induit tout d'abord un manque important de connaissances du comportement des systèmes (domaine d'étude récent, manque de moyens de mesure et d'actionnement adaptés, technologies microtechniques en plein développement) qui confèrent aux travaux présentés, une importance particulière à la validation expérimentale et à l'approche par modèle de connaissance. Plusieurs travaux ont, en premier lieu, consisté à développer de briques génériques comme des principes de mesure de position ou de force à très haut rapport plage/résolution, des systèmes de préhension intelligents ou des modes d'actionnement innovant exploitant l'effet piézoélectrique, tous conduisant à des performances au delà des travaux présents dans la littérature.

Nous avons également étudié les performances de structures de micro (systèmes à jeu) et nano (structures déformables) positionnement notamment leur exactitude et répétabilité. L'exploitation d'un nouveau principe de mesure de position (cité ci-dessus) et la mise en œuvre de techniques d'étalonnage géométrique, ont permis de comprendre le comportement de ces structures, d'en identifier les paramètres influents ainsi d'en déduire un modèle générique adapté. Les travaux réalisés ont également conduit à proposer une métrique adaptée aux problématiques spécifiques de l'échelle considérée et permettent de montrer comment améliorer de 35 fois l'exactitude de positionnement d'une structure microrobotique $XY\Theta$ et de plusieurs fois celle d'une structure de nanopositionnement.

Mes travaux ont également conduit à étudier les principaux verrous à lever pour réaliser des tâches de micromanipulation et de micro-assemblage complexes, à savoir :

- la maîtrise, dans l'espace (selon 6 Degrés de Liberté), des positions relatives des différents référentiels (objet manipulé, outils de manipulation, support d'assemblage) pour lesquelles une exactitude de positionnement inférieure à $1\ \mu m$ est typiquement visée ;
- la prise en compte des forces surfaciques qui apparaissent avant, pendant et après chaque contact mécanique, les effets de ces forces sont prépondérants malgré le manque de connaissance et de modèles associés.

Ces études ont notamment conduit au modèle dynamique multiphysique et multi-directionnel du préhenseur proposé et de définir des stratégies d'assemblage spécifiques. La mise en œuvre d'une commande dynamique hybride force-position a été proposée combinant une commande hybride externe et une commande en impédance afin de maîtriser la dynamique des transitions contact/non-contact critique à l'échelle micrométrique mais aussi pour automatiser un processus d'assemblage complet. Les performances de cette commande en terme de temps de cycle, exactitude de positionnement, robustesse ont été quantifiés expérimentalement. Ces travaux de commande ont été appliqués à l'assemblage d'un micro-banc optique, application générique

que nous avons conçu puis réalisé permettant l'étude et la validation de différentes séquences d'assemblages complexes et typiques.

L'ensemble des travaux réalisés conduisent à la compréhension du comportement des systèmes microrobotiques, à la proposition de nouveaux systèmes micromécatroniques ainsi qu'à leur commande pour réussir à effectuer des tâches microrobotisées complexes, multi-DDL et très précises. Les travaux ont également conduit à plusieurs transferts tant à destination de l'industrie que de l'enseignement.

9.1.2/ DISTINCTIONS PERSONNELLES ET DES DOCTORANTS CO-ENCADRÉS

- | | |
|-------------|--|
| 2015 | Bilal Komati obtient le premier prix de thèse du GDR robotique (prix relatif aux thèses soutenues en 2014) |
| Depuis 2014 | Lauréat de la PEDR (prime d'encadrement doctoral et de recherche) : 3 Maîtres de Conférences de l'UFR-Sciences et Techniques de l'université de Franche-Comté l'ont obtenu pour 33 demandes. |
| 2014 | Co-auteur du 5 ^{ème} article le plus cité (indice h5, année 2014) de la revue internationale à comité de lecture IEEE T-ASE :
M. Rakotondrabe, C. Clévy and P. Lutz, Complete open loop control of hysteretic, creeped and oscillating piezoelectric cantilever, IEEE - Transactions on Automation Science and Engineering (T-ASE), 7(3), pp. 440-450, 2009. |
| | Co-auteur de l'article le plus cité (indice h5, année 2014) de la revue internationale à comité de lecture Micro-Nano Letters :
K. Rabenorosoa, C. Clévy, P. Lutz, M. Gauthier and P. Rougeot, Measurement setup of pull-off force for planar contact at the microscale, Micro-Nano Letters (MNL), vol(4), Issue(3), pp :148-154, september 2009. |
| 2010 | Kanty Rabenorosoa obtient le premier prix de thèse de l'école doctorale SPIM (prix A'Doc). |
| Depuis 2010 | Lauréat de la PES (Prime d'Excellence Scientifique). |
| 2009 | Obtention d'un « special award for regular sessions » lors de la conférence IEEE-ISAM (International Symposium on Assembly and Manufacturing). 1 article sélectionné pour 62 en compétition. |

9.1.3/ ENCADREMENTS

Mes activités de recherche en tant que Maître de Conférences ont conduit à l'encadrement de 6 Post-doctorants, 6 doctorants (3 thèses soutenues et 3 en cours), 17 stagiaires (13 stages de master recherche, 2 Projets de fin d'études et 2 stages de 4^{ème} année d'école d'ingénieur) mais aussi à l'accueil de 2 doctorants étrangers.

Doctorants

Thèses en cours :

Houari BETTAHAR, *Manipulation and 3D Robotized Micro-assembly of Nano-lamellas based nanophotonic structures in SEM environment*, début de la thèse en octobre 2015, Co-encadrement avec Nadège Courjal et Philippe Lutz.

Valérian GUELPA, *Robot control and calibration based on sub-pixellic and multi-directional visual measurement*, Début de la thèse en Octobre 2014, Co-encadrement à 20% avec Guillaume

Laurent, Patrick Sandoz et Nadine Piat.

Adrian CIUBOTARIU, *ctuationDesign, Modeling, Fabrication and Dynamic Motion Control of out-of-plane assembled microstructures with Embedded Piezoelectric A*, Début de la thèse en Octobre 2012, Co-encadrement à 33% avec Ion Alexandru Ivan et Philippe Lutz. Thèse en co-tutuelle entre l'Université de Franche-Comté et l'Université Valahia (Roumaine).

Thèses soutenues :

Bilal KOMATI, *Hybrid Force-Position Control for micro-assembly*, Thèse débutée en Octobre 2011, soutenue le 12 Décembre 2014, Co-encadrement à 50% avec Philippe Lutz, Bilal, est actuellement Post-Doctorant à l'Institut FEMTO-ST. Sa thèse a été récompensée par **le premier prix de thèse du GDR Robotique** (prix de l'année 2015 relative aux thèses soutenues en 2014).

Ning TAN, *Calibration of micro and nano robotic systems - Contribution of influent parameters to the geometric accuracy*, Thèse débutée en Juillet 2010 et soutenue le 16 Décembre 2013, Co-encadrement à 80% avec Nicolas Chaillet, Ning est actuellement Post-doctorant à SUTD (Singapore University of Technology and Design) à Singapour.

Kanty RABENOROSOA, *Automation of reconfigurable microsystems assembly : application to hybrid MOEMS*, Thèse débutée en Octobre 2007 et soutenue le 25 Novembre 2010, Co-encadrement à 50% avec Philippe Lutz, **Premier prix de thèse A'Doc** de l'Université de Franche-Comté et obtention du **"Special award"** à ISAM 2009 (1 papier récompensé sur 62), Kanty est actuellement Maître de Conférences à l'ENSMM.

Accueil de Doctorants étrangers

Ondrej MATUSEK, (PhD Started in 2011, Technical University of Liberec). Duration of the stay at FEMTO-ST : 5 months, Automation of MEMS dies assembly and study of the positioning, Co-supervision in FEMTO-ST with Guillaume Laurent and Brahim Tamadazte.

Paul MOORE, (PhD Started in September 2011 supervised by G. J. Wiens, Univ of Florida). Duration of the stay at FEMTO-ST : 1.5 month Development of a modular compliant micro-assembly platform, Co-supervision in FEMTO-ST with Micky Rakotondrabe.

Post-Doctorants

Vincent CHALVET, *Cartesian actuated and sensorized platform for nanoscale characterization : characterization, modeling and control*, 2013-15 (15 mois, co-encadrement à 50% avec Micky Rakotondrabe), Vincent est actuellement en Post-Doctorat à SUTD (Singapore University of Technology and Design) à Singapour.

Alex BIENAIME, *Microfabricated Multi-Degrees-Of-Freedom Actuated and Sensorized Cartesian Platform for Nanoscale Characterization*, 2012-13 (15 mois, co-encadrement à 50% avec Micky Rakotondrabe), Alex est actuellement en CDI au sein de la société Suisse EMS (Electro Mechanical Systems).

Anne DELETTRE, *Control and Calibration for Micro-Robots*, 2012-13, (21 mois), Anne est actuellement en CDI au sein de la société Française Percipio Robotics.

July GALEANO ZEA, *Vernier Micro-Pattern for Visual Measurement of 1D in-plane Absolute Displacements with Increased Range-to-Resolution Ratio*, 2012, (2 mois, co-encadrement à 33% avec Guillaume Laurent et Patrick Sandoz), July est actuellement Maître de Conférences à l'Institut Technologique Métropolitain de Medellin en Colombie.

Ion LUNGU, *Design of a micro-optical bench platform for micro-assembly characterization*, 2010, (6 mois, co-encadrement à 60% avec Philippe Lutz), Ion est actuellement en CDI au

sein de la société General Electric en Roumanie.

Stagiaires

Noor Mamat Muhamad, Master's degree, Franche-Comté University, Modelling and control of a MEMS with 3 Degrees of Freedom, 2015.

Andrey Kudryavtsev, Master's degree, Franche-Comté University and Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSMM), Visual servoing approach for the automated assembly of MOEMS, 2014.

Intissar Anane, Master's degree, Pierre et Marie Curie University, Multiphysic modelling of a 3 Degrees of Freedom MEMS, 2014.

Harizaka Rakotondratsimba, Master's degree, Franche-Comté University and Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSMM), Port-Hamiltonian control for a one Degree of Freedom microrobot, 2014.

Hedi Nefzaoui, training period, Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques (ENSMM) and Hochschule de Karlsruhe - Germany, Characterization, modelling and calibration an electrothermally actuated micromirror, 2013.

Nathalie Majcherczyk, Université Libre de Bruxelles, microrobotic platform with capillary bridges based actuators, 2012.

Alberto Espinosa, Master's degree, Polytechnic University of Catalonia - Barcelona, Characterization, modelling and calibration of a 3 Degrees Of Freedom MEMS mirror, 2013.

Clément Levrey, Engineering diploma, Supméca, Design and characterization of an instrumented microgripper, 2012.

Nicolas Petit, Master's degree, University of Franche-Comté, Interferometric principle for microscale assembly characterization, 2012.

Lucas Lopes Lemos, Master's degree, Erasmus Mundus Master in Mechatronic and Micro-Mechatronic Systems Vision-based micro force sensing, 2012.

Sebastian Moebes, Master's degree, University of Ilmenau Design of a mechanical reversible linkage system for a modular and reconfigurable contactless conveyor, 2011.

Jean-Philippe Mascaro, Engineering diploma, ENSMM, Characterization of assembled MOEMS, 2010.

Kamel Ncir, Master's degree, University of Montpellier, Design and development of an instrumented table for micro-assembly, in French, 2009.

Vincent Chalvet, Master's degree, University of Franche-Comté, Study of signals generated by a microspectrometer : application to microrobotic calibration, in French, 2009.

Sébastien Alvo, Master's degree, University of Franche-Comté, Calibration of a microrobot for micromanipulation, in French, 2008.

Jérémy Epenoy, Engineering diploma, ENSMM, Detection of microforces through self sensing approach, in French, 2007.

Jing Xu, Master's degree, University of Franche-Comté, Design and development of a micro-manipulation station to assemble microscale ball bearings, in French, 2007.

9.1.4/ PROJETS COLLABORATIFS

Mes activités de recherche me conduisent régulièrement à solliciter des financements ou participer au montage de projets. Par exemple, je porte un projet ANR qui a été récemment soumis (en Avril 2015). Ces projets visent notamment à obtenir des fonds permettant de recruter des doctorants ou post-doctorant, des moyens de mise en œuvre de systèmes expérimentaux mais également de fabrication en salle blanche. Les différents projets dans lesquels j'ai été impliqué sont listés ci-dessous, mentionnant mon rôle au sein de ce projet pouvant aller d'un simple pilotage d'activité scientifique à la coordination du projet complet (indiqué en gras) en passant par des responsabilités de tâches. Les budgets ou subventions obtenues sont indiquées selon les modes de financement. Les projets que j'ai coordonné ont conduit à faire bénéficier le laboratoire de 731 k€ de subventions.

Projets collaboratifs industriels ou pour l'innovation :

- [PI1] Projet XX (2012-2014) : projet partenarial entre le département AS2M et un industriel.
Implication : **Coordinateur du projet et responsable d'une des 4 tâches scientifiques.**
Financement du post-doctorat d'Anne Delettre.
- [PI2] Projet FRI (Regional Funds for Innovation)-Franche-Comté région intitulé COCEMI (2009-13) : Control of microrobotic cells : optimization of microrobotic structures for micro-assembly applications. Budget global de 261 k€
Implication : **Coordinateur du projet. Financement de la thèse de Ning TAN.**
- [PI3] OSEO-ANVAR (2009) : Control of micromanipulation forces. Budget global de 12 k€. Implication : **Coordinateur du projet.**
- [PI4] OSEO-ANVAR (2007) : Micro-assembly system combining vacuum gripping and instrumented microgripper for industrial products. Budget global de 12 k€. Implication : **Coordinateur du projet.**

Projets européens :

- [PE1] Net4M (2010-12) : FP7-People-IRSES. Development of a collaborative network for micro-manufacturing, -assembly and -robotic
Implication : **Séjour à L'université du Texas à Arlington (USA) et étude comparative de deux approches complémentaires de micro-assemblage.**
- [PE2] MicroPadS (2008-10) : FP7-People project. Microstructured Piezoelectric Adaptronic Systems.
Implication : **Etude du self-sensing piézoélectrique**
- [PE3] HYDROMEL (2006-10) : Integrated Project (FP6) on hybrid ultra precision manufacturing process based on positional- and self-assembly for complex micro-products.
Implication : **Etude et réalisation d'un préhenseur et support instrumenté, contribution à l'organisation et à la réalisation d'une école d'été.**
- [PE4] ROBOSEM (2002-05) : Integrated Project (FP6) on the development of a Smart Nano-robot for Sensor-based Handling in a Scanning Electron Microscope.
Implication : **Plusieurs séjours en Allemagne et Suisse (3 mois cumulés), étude et réalisation d'un système de changement automatique d'outils.**

Projet Labex :

Une partie de mes activités scientifiques contribue au labex ACTION (Laboratoire d'excellence dédié aux Systèmes intelligents intégrés dans la matière) notamment dans le cadre du WP4 (Microsystèmes, technologies, composants et intégration) et du Démo 4 (endoscope intelligent).

- [Labex] Projet ROBOPTIC (2013-2015) : projet financé par le Labex ACTION (l'obtention d'un financement passe par un appel à projet avec sélection par le comité exécutif du labex ACTION). Subvention de 9 k€.
Implication : **Coordinateur du projet**

Projets ANR :

- [ANR1] Micro-Nano station XRF (2013) : Station De manipulation interactive dédiée à la caractérisation chimique Par fluorescence X d'objet à l'échelle nanométrique : AAP Défi Nano.
Implication : **Etude de préhension de composant par contrôle en force.**
- [ANR2] MYMESYS (2011-13) : This project deals with the development of embedded multivariable measurement systems for microscale : APP Émergence, subvention de 260 k€. Implication : **Responsable du sous projet "Calibration Device Design and Tests", financement du post-doc d'Alex Bienaimé.**
- [ANR3] SMART BLOCKS (2011-14) : This project deals with a modular and reconfigurable surface composed of MEMS for the rapid transport of fragile and pharmaceutical objects. Implication : **Etude d'un système de solidarisation temporaire reconfigurable, financement du post-doc de July Galeano-Zea.**
- [ANR4] NANOROL (2008-12) : This project deals with microworld modelling and measurement on interaction between micro-objects.
Implication : **Etude comparative de deux approches complémentaires de micromanipulation (environnement sec et liquide).**

Projets régionaux :

- [PR1] Nano-ROBOPTIC Franche-Comté région (2015-18) : MOEMS microfabriqués et micro-assemblés : microscopie et horloge atomique sur puce. Subvention de 260 k€. Implication : **Coordinateur du projet, financement de la thèse de Houari Bettahar.**
- [PR2] MIOP-MICROROB Franche-Comté région (2011-14) : MOEMS microfabriqués et micro-assemblés : microscopie et horloge atomique sur puce. Subvention de 140 k€. Implication : **Etude de principes de commandes en force et commande hybride force-position, Financement de la thèse de Bilal Komati.**
- [PR3] BQR (Bonus Quality Research)-ENSMM project (2010-11) : This project addresses the development and control of an instrumented platform dedicated to measure microforces. Budget de 25 k€
Implication : **Coordination du projet avec Micky Rakotondrabe**
- [PR4] MIOP –CODYCO région Franche-Comté (2009-12) : Microsystems for instrumented optical chips.
Implication : **Etude et conception de composants pour micro-banc optique, financement du post-doc de Ion Lungu.**
- [PR5] MIAAMI : région Franche-Comté (2006-09). Flexible micromanipulation cell for the assembly of hybrid MOEMS : Application to micro-optical benches. Subvention de 140 k€.
Implication : **Modélisation de systèmes de préhension, étude du concept de micro-banc optique et du micro-assemblage par mode téléopéré, financement de la thèse de Kanty Rabenoroso.**

9.1.5/ ORGANISATION DE MANIFESTATIONS SCIENTIFIQUES

- 2012 Member of the program committee and organization committee of the 1st workshop on *New Trends and Challenges in Modeling and Control of Microsystems*, Besançon, France.
- 2011 Organisation d'une journée trans-GDR (GDR robotique et GDR Micro-Nano Systèmes) intitulée *Micromanipulation pour les MicroNano Systèmes*, 55 participants.
- 2011 Co-organisation du workshop *Automation of Assembly and Packaging at the Micro/Nano-Scale* (M. Rakotondrabe, Y. Haddab, C. Clévy and P. Lutz) à IEEE CASE International Conference on Automation Science and Engineering, Workshop, Trieste, Italy, August.
- 2011 Co-Organisation Journée Technique nationale *Micro-assemblage intitulée Microélectronique et MEMS, du packaging au micro-assemblage, nouvelle génération de micro-systèmes obtenus par assemblage de dies* (M. Gauthier, C. Clévy), 62 participants.
- 2010 Co-organisation du workshop *Signal measurement and estimation techniques issues in the micro/nano-world* (C. Clévy, M. Rakotondrabe and N. Chaillet) lors de la conférence IEEE ICRA (International Conference on Robotics and Automation), Anchorage Alaska.
- 2010 Membre du comité d'organisation de l'école d'été *Microrobotics and self-assembly for hybrid MEMS* dans le cadre du projet européen Hydromel.

9.1.6/ COLLABORATIONS INTERNATIONALES

Mes travaux ont conduit à différentes collaborations internationales qui ont permis de comparer des résultats issus d'approches complémentaires à celles que j'ai pu étudier, mais également de bénéficier de compétences complémentaires. Ces échanges ont été intéressants et importants en regard de la grande multi-disciplinarité des travaux menés, des nombreux principes physiques exploités, des nombreuses technologies utilisées ou de la simple étendue scientifique (étude, modélisation, identification, commande, mise en œuvre expérimentale). Les travaux présentés ci-dessous sont ceux qui ont conduit à des publications communes :

Université de Valahia à Targoviste (Roumanie), faculté d'ingénierie Electrique, équipe du Professeur Dinu COLTUC. Cette collaboration a induit la thèse en co-tutelle (Univ. de franche-Comté, Univ. de Valahia) d'Adrian Cuiborariu et a permis d'apporter des compétences de mise en œuvre de matériaux actifs (le PMN-PT en l'occurrence) complémentaires à nos compétences de modélisation et de commande.

Université de Floride à Gainesville (USA), Dept. of Electrical and Computer Engineering, équipe du Professeur Huikai Xie avec qui nous menons des travaux de modélisation et de commande de micromiroirs MEMS actionnés par principe électrothermique. Cette collaboration a été initiée par les travaux de deux stagiaires (Alberto Espinosa et Noor Mamat Muhamad) a permis plusieurs périodes d'échanges, le Professeur Xie a notamment séjourné au sein de notre département pendant un mois en tant que professeur invité, inversement, Kanty Rabenoroa a pu séjourner 1 mois en Floride pendant sa thèse. Ces travaux ont ensuite conduit à une thèse en co-tutelle, actuellement en cours, pour la réalisation d'un endoscope OCT (acronyme Anglais pour Optical Coherence Tomography), travaux qui se déroulent par ailleurs dans le cadre du démo 4 "Endoscope Intelligent" du Labex Action.

Université du Texas à Arlington (USA), Dept. of Electrical Engineering, équipe du Professeur Dan O. Popa qui mène des travaux de micro-assemblage robotisé exploitant un principe de préhension passif (dédié), cette approche est très complémentaire à celle que nous menons au sein d'AS2M où nous exploitons un principe de préhension actif (versatile). Nous avons

ainsi pu mener plusieurs études comparatives et d'autres plus conjointes (commande en force notamment). Kanty Rabenorosoa et Bilal Komati ont ainsi été accueillis par Prof. Popa pour des périodes de 2 mois chacun. Plusieurs séjours de permanents ont également pu avoir lieu (j'y suis allé à plusieurs reprises pour des durées d'une ou deux semaines).

Université Libre de Bruxelles (Belgique), Dep. Bio, Electro And Mechanical Systems, équipe du Professeur Pierre Lambert qui s'intéresse aux effets de tension de surface. Des travaux communs réalisés dans le cadre du stage de Nathalie Majcherczyk, ont notamment permis de proposer une plateforme instrumentée originale puisque sa structure parallèle est actionnée par des gouttes de liquide de volume contrôlable.

Université de Floride (USA), Dep. of Mechanical and aerospace Engineering, équipe de Gloria J. Wiens. Cette collaboration nous a permis d'accueillir Paul Moore au sein d'AS2M (séjour d'un mois et demi) et qui a permis, via des compétences en mécanismes flexibles de concevoir une plateforme compliant instrumentée.

Technical University of Liberec (République Tchèque), Dep. of Glass Producing Machines and Robotics, équipe de Vlastimil Hotar, collaboration qui a permis d'accueillir Ondrej Matusek au sein d'AS2M (séjour de 6 mois) pendant sa thèse. Les travaux ont porté sur l'étude d'algorithmes de traitement d'images en environnement difficiles.

9.1.7/ RESPONSABILITÉS COLLECTIVES

- 2009-2010 Mise en place et responsabilité d'un des 4 thèmes scientifique de l'équipe SAMMI (Systèmes Automatisés de Micromanipulation et Micro-assemblage). Intitulé du thème : « systèmes mécatroniques et adaptroniques » de l'équipe SAMMI (4 thèmes constituent l'équipe). Ce thème fédérait les activités de 12 enseignants-chercheurs et chercheurs permanents, cette structuration intermédiaire a conduit aux 4 équipes constituant actuellement le département.
- 2009-2010 Membre du COS (Conseil d'Orientation Scientifique) du département AS2M de l'institut FEMTO-ST.
- 2011-auj Valorisation d'une partie des travaux lors la création de la société percipio-robotics (David Hériban).
- 2010-auj Membre de plusieurs commissions de recrutement had-hoc : recrutement de trois Maîtres de conférences (deux à l'université de Franche-Comté et un à l'université technologique de Compiègne) et de plusieurs ATER à l'université de Franche-Comté.
- 2013 Expertise scientifique pour l'ANR, programme ASTRID.
- 2011-2012 Expertises scientifiques pour l'« academy of Finland, Research Council for Natural Sciences and engineering ».
- 2009-2013 Participation active à l'un des 5 programmes transverses de l'institut FEMTO-ST intitulé « Microsystèmes pour l'instrumentation optique sur puces » entre les départements d'optique, MN2S (Micro et Nano Sciences et Systèmes) et AS2M (Automatique et Systèmes MicroMécatroniques).
- 2008-2009 Membre suppléant de la Commission de Spécialistes d'Etablissement, section 61.
- 2003-2005 Membre élu du conseil du Laboratoire d'Automatique de Besançon.
- 2003-2006 Contribution à l'organisation de congrès ISATP-2003, du congrès du club EEA-2004, du workshop IWMF 2006.

9.1.8/ MEMBRE DE COMITÉS DE RÉDACTION OU D'ORGANISATION DE REVUES OU DE CONGRÈS

Co-édition d'un numéro spécial dans la revue IEEE T-ASE (Transactions on Automation Science and Engineering) avec Karl Bohringer, Philippe Lutz, Dan Popa, Quan Zhou et Cédric Clévy. Numéro publié en Mai 2013 intitulé Special issue on Micro-Assembly for manufacturing at small scales.

Éditeur associé invité de la revue IEEE T-ASE depuis 2011.

Éditeur associé de la revue IJARS (International Journal of Advanced Robotic Systems) depuis 2013 au sein du topic « micro et nano robotique ».

Éditeur associé des Conférences IEEE CASE 2014, IEEE CASE 2015.

Reviewer pour journaux internationaux (IEEE Transaction on Mechatronics, IEEE Transaction on Robotics, IEEE Transaction on Mechatronics, IEEE Transaction on Automation Science and Engineering, Journal of Micromechanics and Microengineering, International journal of optomechatronics, Review of Industrial Robots, Assembly automation, Copernicus material science, micromachines).

Co-chair des sessions micromanipulation des conférences internationales IEEE ICRA 2014 et IEEE AIM 2014.

Reviewer pour conférences internationales (IEEE ICRA, IEEE IROS, ISOT, IEEE CASE, IEEE AIM, IDETC, IWMF).

9.2/ ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT

9.2.1/ ENSEIGNEMENT

Dans le cadre de mes activités d'enseignement, je fais partie, avec 11 autres collègues permanents, du GAP (Groupe Automatique et Productique), service d'enseignement de l'UFR-Sciences et techniques de l'Université de Franche-Comté. A ce titre, je réalise la majorité de mes enseignements dans les formations de l'UFR-ST, mais j'interviens également dans d'autres composantes de l'université (IUT Génie mécanique, ISIFC : Institut supérieur d'ingénieurs de Franche-Comté) ou établissement (ENSMM - École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques).

Les matières que j'enseigne sont principalement l'automatique continue et séquentielle, la modélisation des systèmes mécatroniques, la micromécatronique et microrobotique. J'interviens dans un large panel de formations qu'elles soient à finalité recherche ou professionnelle :

- Licence SST - Science Santé Technologie ;
- Master Mécatronique et Microsystèmes ;
- Licence pro ARIA (Automatique et Informatique Industrielle) ;
- Licence pro GPI (Gestion de Production Industrielle) ;
- Master SAPIAA (Systèmes Automatisés de Production dans les Industries Agro-Alimentaires) ;
- l'ISIFC (Institut supérieur d'ingénieurs de Franche-Comté) ;
- l'ENSMM (École nationale supérieure de mécanique et des microtechniques de Besançon).

Les enseignements réalisés sont majoritairement sous forme classique (Cours/TD/TP) mais la

pédagogie par projet s'insère progressivement et de manière croissante. Ma charge moyenne d'enseignement était de 270 h eq. TD jusqu'en 2013, date à laquelle je suis devenu responsable de la spécialité de master SAPIAA. Depuis cette date, mon service est d'environ 200 h eq. TD.

9.2.2/ RESPONSABILITÉS

Depuis 2013, je suis **responsable de la spécialité SAPIAA** (Systèmes Automatisés de Production dans les Industries Agro-Alimentaires) du master Sciences des aliments : gestion du recrutement des étudiants et leur suivi post-formation, définition de la maquette pédagogique, gestion des aspects financiers (gestion du budget d'env. 80 k€, déclarations UFC et CFA-Sup de Franche-comté), responsable hiérarchique de 2 secrétaires (1,5 ETP), mise en place d'un demi-poste de secrétariat complémentaire, resp. de l'apprentissage, des conventions avec établissements partenaires, de l'insertion au sein du PRES Bourgogne-Franche-Comté, lien avec les entreprises, la communication, conseil de perfectionnement, amélioration continue de la formation (certifiée ISO 9001), mise en place de pédagogie par projet. . .

De 2007 à 2013 j'ai été **responsable pédagogique** du Master 2 SAPIAA : mise en œuvre de la maquette pédagogique, réalisation des emplois du temps, membre actif du comité de pilotage de la spécialité, gestion des heures d'enseignement et budget pédagogiques associés.

Participation à la **rédaction de la maquette pédagogique** du master SPI mentions SAPIAA et mécatronique et microsystèmes.

Participation au **montage de nouvelles formations** : CMI (Cursus Master Ingénierie), master Erasmus.

Participation au PRES Bourgogne Franche-Comté dans le cadre du master SPI mention SAPIAA.

Participation à la création de plusieurs Unités d'Enseignement (« micromécatronique et microsystèmes », « microrobotique » notamment) liées aux activités recherche du département AS2M de FEMTO-ST (UE du master mécatronique et microsystèmes).

Responsable de 7 modules, achats et mise en œuvre de plusieurs systèmes pédagogiques, montage de TP, de cours, de TD, encadrement de moniteurs et vacataires, gestion de salle de TP.

Membre de plusieurs commissions de recrutement ad-hoc (recrutement de 2 Maîtres de conférences et ATER tous à l'université de Franche-Comté).

Membre suppléant de la Commission de Spécialistes d'Établissement, section 61 en 2008.

9.2.3/ TRANSFERT RECHERCHE-ENSEIGNEMENT

Mes activités de recherche ont régulièrement conduit à des transferts de connaissances et de compétences vers les formations adossées à la recherche, principalement le master mécatronique et microsystèmes. Ces transferts ont contribué à l'évolution de ces formations et aussi à une meilleure adéquation du profil des étudiants sortant de ces formations avec les besoins en recrutement pour les activités de recherche, les principales contributions sont relatives aux modules suivants :

- **Micromécatronique et microsystèmes** du master mécatronique et microsystème (10h de cours, 5h de TD, 8h de TP) : ce module créé en 2006 permet d'aborder les matériaux

actifs, structures compliant actionnées, les problématiques de la micromanipulation et du micro-assemblage, plusieurs exemples de systèmes micromécatroniques et des technologies de microfabrication hors salle blanche. Les TP sont réalisés via des plateformes expérimentales issues des activités de recherche : étude des matériaux piézoélectriques et Alliages à mémoire de forme.

- **Microrobotique** du master mécatronique et microsystème (2h de cours, 2h de TD, 4h de TP) : ce module créé en 2012 permet d'étudier les spécificités de l'échelle micrométrique pour des problématiques de commande robotique (Etalonnage et commande hybride force-position). La plateforme expérimentale de TP est issue d'un transfert des activités de recherche : principe de mesure par vision à très haut rapport plage/résolution de mesure pour l'étude des défauts de positionnement d'un porteur microrobotique $XY\Theta$.
- **Procédés de fabrication innovants** de l'ENSMM (2h de cours, 2h de TD et 9h de TP). Ce module permet d'aborder la fabrication de composants miniatures par micro-assemblage robotisé, dans un esprit de micro-usine. Trois travaux pratiques sont proposés : micromanipulation par capillarité, micromanipulation automatisée par retour visuel, préhenseur agile actionné par matériaux piézoélectrique (issu d'un transfert des activités recherche).

Enfin, j'ai aussi pu **participer à deux écoles d'été** « highlight in Microtechnology » et « Micro-robotics and self-assembly for hybrid MEMS », notamment en proposant des travaux pratiques réalisés sur des plateformes issues d'un transfert des activités de recherche.

ANNEXE B : PUBLICATIONS PERSONNELLES

Mes différentes activités de recherche ont conduit à la publication et production scientifique suivante (les articles issus des travaux de thèse sont marqués d'une astérisque) :

- 23 Articles de revues internationales à comité de lecture ;
- 44 conférences, workshops et séminaires internationaux à comité de lecture ;
- 1 livre édité ainsi qu'un numéro spécial de revue internationale ;
- 5 chapitres de livre ;
- 2 communications nationales.

10.1/ LIVRES ET CHAPITRES DE LIVRES

[B6] M. Gauthier, C. Clévy, D. Hériban and P. Kallio, *Industrial Tools for Micromanipulation*, in Micro-and Nanomanipulation Tools, [John Wiley Sons](#), August 2015.

[B5] A. Bolopion et C. Clévy, *Domaines d'Application de la microrobotique*, [Techniques de l'ingénieur](#), article s7777, Octobre 2015.

[B4] C. Clévy, M. Rakotondrabe and N. Chaillat, *Signal Measurement and Estimation Techniques for Micro and Nanotechnology*, [Springer](#), ISBN 978-1-4419-9945-0 (2011).

[B3] C. Clévy and M. Rakotondrabe, *Microscale specificities*, in Signal Measurement and Estimation Techniques for Micro and Nanotechnology, [Springer](#), ISBN 978-1-4419-9945-0 (2011).

[B2] J. Agnus, M. Boukallel, C. Clévy, S. Dembélé, S. Régner, *Architecture of a micromanipulation station*, in Microrobotics for micromanipulation, [Wiley ISTE \(Ed.\)](#), ISBN 978-1-84821-186-5 (2010).

[B1] J. Agnus, M. Boukallel, C. Clévy, S. Dembélé, S. Régner, *Architecture d'une station de Micromanipulation*, dans La microrobotique : Applications à la micromanipulation, [HERMES Science \(Ed.\)](#), ISBN 2746218852 (2008).

10.2/ CO-ÉDITION DE NUMÉRO SPÉCIAL EN REVUE

[JS1] P. Lutz, K. F. Bohringer, C. Clévy, D. O. Popa and Q. Zhou, *Guest Editorial Microassembly for Manufacturing at Small Scales*, [IEEE Transaction on Automation Science and En-](#)

gineering, 10(3), 2013.

10.3/ REVUES INTERNATIONALES À COMITÉ DE LECTURE

- [J24] V. Chalvet, D. Habineza, M. Rakotondrabe and C. Clévy, *Hysteresis characterization of novel thick-film PZT microactuators*, [Elsevier Physica B : Condensed Matter](#), accepted 2015.
- [J23] N. Tan, C. Clévy, G. Laurent, P. Sandoz and N. Chaillet, *Accuracy Quantification and Improvement of Serial Micropositioning Robots for In-Plane Motions*, [IEEE Transaction on Robotics \(T-Ro\)](#), 31(6), pp. 1497-1507, December 2015.
- [J22] N. Tan, C. Clévy and N. Chaillet, *Calibration of Nanopositioning Stages*, [Micromachines](#), 6(12), pp. 1856-1875, December 2015.
- [J21] V. Guelpa, G. J. Laurent, P. Sandoz and C. Clévy, *Vision-based microforce measurement with a large range-to-resolution ratio using a twin-scale pattern*, [IEEE/ASME Transaction on Mechatronics \(T-Mech\)](#), 20(6), pp.3148-3156, December 2015.
- [J20] A. V. Kudryavtsev, G. J. Laurent, C. Clévy, B. Tamadazte and P. Lutz, *Analysis of CAD Model-based Visual Tracking for Microassembly using a New Block Set for MATLAB/Simulink*, [International Journal of Optomechatronics \(IJO\)](#), 9(4), July 2015.
- [J19] A. Bienaimé, V. Chalvet, C. Clévy, L. Gauthier-Manuel, T. Baron and M. Rakotondrabe, *Static / dynamic trade-off performance of PZT thickfilm micro-actuators*, [Journal of Micromechanics and Microengineering \(JMM\)](#), 25, 075017, June, 2015.
- [J18] N. Tan, C. Clévy and N. Chaillet, *Performance analysis and characterisation of micro-nanopositioning systems*, [Electronics Letters](#), 50(24), pp.1853-55, November 2014.
- [J17] A. Espinosa, X. Zhang, K. Rabenoroso, C. Clévy, S. R. Samuelson, B. Komati, H. Xie, and P. Lutz, *Piston Motion Performance Analysis of a 3DOF Electrothermal MEMS Scanner for Medical Applications*, [International Journal of Optomechatronics \(IJO\)](#), 8(3), June 2014.
- [J16] V. Guelpa, G. J. Laurent, P. Sandoz, J. Galeano Zea and C. Clévy, *Subpixelic Measurement of Large 1D Displacements : Principle, Processing Algorithms, Performances and Software*, [Sensors](#), 14(3), 5056-5073, March 2014.
- [J15] B. Komati, J. Agnus, C. Clévy and P. Lutz, *Prototyping of a high performant and integrated piezoresistive force sensor for microscale applications*, [Journal of Micromechanics and Microengineering \(JMM\)](#), 24, 035018, February 2014.
- [J14] C. Clévy, I. Lungu, K. Rabenoroso and P. Lutz, *Positioning Accuracy Characterization of Assembled Microscale Components for Micro-Optical Benches*, [Assembly Automation \(AA\)](#), 34(1), pp. 68-77, January 2014.
- [J13] B. Piranda, G. J. Laurent, J. Bourgeois, C. Clévy, S. Möbes and N. Le Fort-Piat, *A New Concept of Planar Self-Reconfigurable Modular Robot for Conveying Microparts*, [IFAC Mechatronics](#), 23(7), pp 906–915, October 2013.
- [J12] J. G. Zea, P. Sandoz, G. Laurent, L. L. Lemos and C. Clévy, *Twin-scale Vernier Micro-Pattern for Visual Measurement of 1D in-plane Absolute Displacements with Increased Range-to-Resolution Ratio*, [International Journal of Optomechatronics \(IJO\)](#), 7(3), pp. 222-234, 2013.
- [J11] B. Komati, K. Rabenoroso, C. Clévy and P. Lutz, *Automated Guiding Task of a Flexible Micropart Using a Two-Sensing-Fingers Microgripper*, [IEEE Transactions on Auto-](#)

mation Science and Engineering (T-ASE), A10(3), pp. 515-524, 2013.

[J10] J. Agnus, N. Chaillet, C. Clévy, S. Dembélé, M. Gauthier, Y. Haddab, G. Laurent, P. Lutz, N. Piat, K. Rabenoroso, M. Rakotondrabe and B. Tamadazte *Robotic Microassembly and micromanipulation at FEMTO-ST*, *Journal of Molecular Biology Research (JMBR)*, 8(2), pp 91-106, 2013.

[J9] K. Rabenoroso, C. Clévy, Q. Chen and P. Lutz, *Study of Forces during Micro-Assembly Tasks using Two-Sensing-Fingers Gripper*, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics (T-Mech)*, pp 811-821, 17(5), October 2012.

[J8] S. Bargiel, K. Rabenoroso, C. Clévy, C. Gorecki and P. Lutz, *Towards Micro-Assembly of Hybrid MOEMS Components on Reconfigurable Silicon Free-Space Micro-Optical Bench*, *Journal of Micromechanics and Microengineering (JMM)*, 20(4), 2010.

[J7] K. Rabenoroso, S. Bargiel, C. Clévy, P. Lutz and C. Gorecki, *Assembly of 3D Reconfigurable Hybrid MOEMS through Microrobotic Approach*, *Lecture Notes in Automation, Frontiers of Assembly and Manufacturing*, pp. 99-112, 2010.

[J6] K. Rabenoroso, C. Clévy, P. Lutz, M. Gauthier and P. Rougeot, *Measurement setup of pull-off force for planar contact at the microscale*, *Micro-Nano Letters (MNL)*, 4(3), pp :148-154, September 2009.

[J5] M. Rakotondrabe, C. Clévy and P. Lutz, *Complete open loop control of hysteretic, creeped and oscillating piezoelectric cantilever*, *IEEE - Transactions on Automation Science and Engineering (T-ASE)*, 7(3), pp. 440-450, 2009.

[J4]* C. Clévy, A. Hubert ; N. Chaillet, *Flexible Micro-Assembly System Equipped with an Automated Tool Changer*, *Journal of Micro-Nano Mechatronics*, 4(1), pp59-72, 2008. (

[J3]* C. Clévy, A. Hubert, J. Agnus N. Chaillet, *A micromanipulation cell including a tool changer*, *Journal of Micromechanics and Microengineering (JMM)*, 15(10), pp.292-301, October 2005.

[J2]* R. Pérez, J. Agnus, C. Clévy, A. Hubert, N. Chaillet, *Modelling, fabrication and validation of a high performance 2 DOF piezoactuator for micromanipulation*, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics (T-Mech)*, 10(2), April 2005.

[J1]* P. de lit, J. Agnus, C. Clévy, N. Chaillet, *A four-degree-of-freedom microprehensile microrobot on chip*, *Assembly and automation*, 24(1), pp.33-42, 2004.

10.4/ COMMUNICATIONS INTERNATIONALES DANS DES CONGRÈS AVEC ACTES

[C45] B. Komati, C. Clévy, N. Courjal, G. Ulliac and P. Lutz, *Microrobotic Station for Nano-Optical Component Assembly*, *ISOT International Symposium on Optomechatronic Technologies*, Vol. 32, p. 06002, October 2015.

[C44] N. Mamat, K. Rabenoroso, C. Clévy, P. Lutz and H. Xie, *Multiphysics and Parallel Kinematics Modeling of a 3DOF MEMS Mirror*, *ISOT International Symposium on Optomechatronic Technologies*, Vol. 32, p. 01004, October 2015.

[C43] A. V. Kudryavtsev, G. J. Laurent, C. Clévy, B. Tamadazte and P. Lutz, *Stereo Vision-based Control for Automated MOEMS Assembly*, *IEEE/RSJ IROS International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Hamburg, Germany, October, 2015.

- [C42] D. A. Ciubotariu, C. Clévy, I. A. Ivan and P. Lutz, *Actuated MOEMS Micro-Mirror based on PMN-PT Piezoelectric Material*, [ISOT International Symposium on Optomechatronic Technologies](#), Seattle, USA, November, 2014.
- [C41] A. V. Kudryavtsev, G. J. Laurent, C. Clévy, B. Tamadazte and P. Lutz, *Characterization of Model-based Visual Tracking Techniques for MOEMS using a New Block Set for MATLAB/Simulink*, [ISOT International Symposium on Optomechatronic Technologies](#), Seattle, USA, November, 2014.
- [C40] D. A. Ciubotariu, I. A. Ivan, C. Clévy and P. Lutz, *Size-dependent Analysis and Experiments of Bulk PMN-PT [001] Piezoelectric Actuator for MOEMS Micro-Mirrors*, [IEEE/ASME AIM International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics](#), Besançon, France, July, 2014.
- [C39] B. Komati, C. Clévy, M. Rakotondrabe and P. Lutz, *Dynamic Force/Position Modeling of a one-DOF Smart Piezoelectric Micro-Finger with Sensorized End-Effector*, [IEEE/ASME AIM International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics](#), Besançon, France, July, 2014.
- [C38] N. Majcherczyk, K. Rabenorosoa, C. Clévy, R. Mincheva, J. M. Raquez, M. Viallon, M. Mastrangeli and P. Lambert, *Experimental Characterization of a Droplet-Actuated Microassembly Platform : Towards Closed-Loop Control*, [IEEE/ASME AIM International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics](#), Besançon, France, July, 2014.
- [C37] B. Komati, C. Clévy and P. Lutz, *Force Tracking Impedance Control with Unknown Environment at the Microscale*, [IEEE ICRA International Conference on Robotics and Automation](#), Hong Kong, China, June 2014.
- [C36] N. Tan, C. Clévy, G. J. Laurent, P. Sandoz and N. Chaillet, *Characterization and compensation of XY micropositioning robots using vision and pseudo-periodic encoded patterns*, [IEEE ICRA International Conference on Robotics and Automation](#), Hong Kong, China, June 2014.
- [C35] A. Espinosa, X. Zhang, K. Rabenorosoa, C. Clévy, S. R. Samuelson, B. Komati, H. Xie, and P. Lutz, *Piston Motion Performance Analysis of a 3DOF Electrothermal MEMS Scanner for Medical Applications*, [ISOT International Symposium on Optomechatronic Technologies](#), Jeju Island, Korea, October 2013.
- [C34] B. Komati, M. R. Pac, I. Ranatunga, C. Clévy, D. Popa and P. Lutz, *Explicit Force Control v.s. Impedance Control for Micromanipulation*, [ASME-IDETC International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference](#), Portland, USA, August 2013.
- [C33] I. A. Ivan, D. A. Ciubotariu, C. Clévy, P. Lutz, and N. Chaillet, *Duo-bimorph actuator made of PMN-PT [011] : 3D modeling, development and characterization*, [IEEE/ASME AIM International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics](#), Wollongong, Australia, July 2013
- [C32] N. Tan, C. Clévy and N. Chaillet, *Calibration of Single-axis Nanopositioning Cell Subjected to Thermal Disturbance*, [IEEE ICRA International Conference on Robotics and Automation](#), Karlsruhe, Germany, May, 2013.
- [C31] N. Tan, C. Clévy, G. J. Laurent and N. Chaillet, *Calibration and Validation of XY-Theta Micropositioners with Vision*, [IEEE/ASME AIM International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics](#), Kaohsiung, Taiwan, July, 2012

- [C30] I. Alexandru Ivan, M. Ardeleanu, G. J. Laurent, N. Tan and C. Clévy, *The metrology and applications of PSD (position sensitive detector) sensors for microrobotics*, [ISOT International Symposium on Optomechatronic Technologies](#), Paris, France, October, 2012
- [C29] P. Moore, M. Rakotondrabe, C. Clévy and G. Wiens, *Development of a Modular and Compliant Micro-Assembly Platform with Integrated Force and Compliance Measurement Capabilities*, [ICOMM 7th International Conference on MicroManufacturing](#), Northwestern University, March, USA, 2012
- [C28] S. Mobes, B. Piranda, G. J. Laurent, J. Bourgeois, C. Clévy and N. Le Fort-Piat, *Toward a 2D Modular and Self-Reconfigurable Robot for Conveying Microparts*, [IEEE dMEMS Workshop on Design, Control and Software Implementation for Distributed MEMS](#), Besancon, France, 2012.
- [C27] M. Rakotondrabe, Y. Haddab, C. Clévy and P. Lutz, *Automation of Assembly and Packaging at the Micro/Nano-Scale*, [IEEE CASE International Conference on Automation Science and Engineering](#), Workshop, Trieste, Italy, August, 2011. Organizer of the workshop.
- [C26] M. Gauthier, C. Clévy, S. Dembelé, B. Tamadatze, K. Rabenoroso, N. Piat and P. Lutz, *Overview of out of plane MEMS assembly techniques*, presented in the workshop : 'MEMS assembly and packaging : trends and challenges for robotics in the microscale', [IEEE ICRA International Conference on Robotics and Automation](#), Workshop, Shanghai, China, May, 2011. Workshop talk.
- [C25] K. Rabenoroso, C. Clévy, S. Bargiel, J. P. Mascaro, P. Lutz and C. Gorecki, *Modular and Reconfigurable 3D Micro-Optical Benches : Concept, Validation, and Characterization*, [ASME-IDETC International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference](#), Washington, USA, August, 2011.
- [C24] K. Rabenoroso, C. Clévy, and P. Lutz, *Automated Micro-assembly Tasks based on Hybrid Force/Position Control*, [IWMF International Workshop on MicroFactories](#), Daejeon, Korea, October, 2010.
- [C23] K. Rabenoroso, C. Clévy, and P. Lutz, *Hybrid Force/Position Control applied to Automated Guiding Tasks at the Microscale*, [IEEE/RSJ IROS International Conference on Intelligent Robots and Systems](#), Taipei, Taiwan, October, 2010.
- [C22] S. Bargiel, K. Rabenoroso, J. P. Mascaro, C. Clévy, C. Gorecki and P. Lutz, *Technology Platform for Hybrid integration of MOEMS on Reconfigurable silicon Micro-Optical Table*, [Eurosensors](#), Linz, Austria, September, 2010.
- [C21] M. Rakotondrabe, C. Clévy, K. Rabenoroso, and K. Ncir Presentation, *Force Estimation and Control of an Instrumented platform dedicated to Automated Micromanipulation Tasks*, [IEEE CASE Conference on Automation Science and Engineering](#), Toronto, Canada, August 2010.
- [C20] K. Rabenoroso, C. Clévy, M. Rakotondrabe, and P. Lutz, *Guiding Strategies for the Assembly of Micro-Components Subjected to Planar Pull-Off Forces*, [ASME IDETC-CIE International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference](#), Montréal, Canada, August 2010.
- [C19] M. Rakotondrabe, I. A. Ivan, S. Khadraoui, C. Clévy, P. Lutz and N. Chaillet, *Dynamic displacement self-sensing and robust control of cantilevered piezoelectric actuators dedicated to microassembly tasks*, [IEEE/ASME - AIM International Conference on Intelligent Mechatronics](#), Montréal Canada, July 2010.

- [C18] M. Rakotondrabe, C. Clévy, I. A. Ivan and N. Chaillet, *Observer Techniques Applied to the Control of Piezoelectric Microactuators*, presented in the workshop : 'Signals Measurement and Estimation Techniques Issues in the Micro/Nano-World', [IEEE ICRA International Conference on Robotics and Automation](#), Workshop, Anchorage, Alaska, May, 2010. Workshop talk.
- [C17] C. Clévy, M. Rakotondrabe and N. Chaillet, *Signals Measurement and Estimation Techniques Issues in the Micro/Nano-World*, [IEEE ICRA International Conference on Robotics and Automation](#), Workshop, Anchorage, Alaska, May, 2010. Organizer of the workshop.
- [C16] K. Rabenoroso, C. Clévy, and P. Lutz, *Active Force Control for guiding Tasks during Micro-Assembly*, [IEEE ICRA International Conference on Robotics and Automation](#), Anchorage, Alaska, May, 2010.
- [C15] K. Rabenoroso, C. Clévy, P. Lutz, S. Bargiel, and C. Gorecki, *A Micro-Assembly Station used for 3D Reconfigurable Hybrid MOEMS Assembly*, [IEEE ISAM International Symposium on Assembly and Manufacturing](#), Suwon, Korea, September 2009 (**Special Award** for contributions to regular sessions, 1 paper out of 62).
- [C14] K. Rabenoroso, A. N. Das, R. Murthy, C. Clévy, D. Popa and P. Lutz, *Precise motion control of a piezoelectric microgripper for microspectrometer assembly*, [ASME IDETC-CIE International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference](#), San Diego, USA, September 2009.
- [C13] M. Rakotondrabe, C. Clévy and P. Lutz, *Hysteresis and Vibration Compensation in a NonLinear Unimorph Piezocantilever*, [IEEE/RSJ IROS International Conference on Intelligent Robots and Systems](#), Nice, France, September, 2008.
- [C12] M. Rakotondrabe, C. Clévy and P. Lutz, *Modelling and Robust Position/Force Control of a Piezoelectric Microgripper*, [IEEE CASE Conference on Automation Science and Engineering](#), Scottsdale, USA, September, 2007.
- [C11] M. Rakotondrabe, C. Clévy and P. Lutz, *H-inf. deflection control of a unimorph piezoelectric cantilever under thermal disturbance*, [IEEE/RSJ IROS International Conference on Intelligent Robots and Systems](#), San Diego, USA, October, 2007.
- [C10]* C. Clévy, A. Hubert et N. Chaillet, *Micromanipulation and Micro-Assembly Systems*, [IEEE/RAS IARP International Advanced Robotics Program](#), Paris, France, October, 2006.
- [C9]* C. Clévy, A. Hubert et N. Chaillet, *Temporary fixing systems for applications in microrobotics*, [IFAC Mechatronics Symposium on Mechatronic Systems](#), Heidelberg, Germany, September, 2006.
- [C8]* C. Clévy, A. Hubert and N. Chaillet, *Modeling, identification and control of a thermal glue-based fixing system : application to the micro-robotic field*, [IEEE ICRA International Conference on Robotics and Automation](#), Orlando, USA, May, 2006.
- [C7]* C. Clévy, A. Hubert, S.Fahlbusch, N. Chaillet and J. Michler, *Design, fabrication and characterization of a flexible system based on thermal glue for in air and in SEM microassembly*, [IPAS International Precision Assembly Seminar](#), Bad Hofgastein, Austria, February, 2006
- [C6]* M. Gauthier, B. Lopez-Walle and C. Clévy, *Comparison between micro-objects manipulations in dry and liquid mediums*, [IEEE CIRA International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation](#), Espoo, Finland, June, 2005.
- [C5]* C. Clévy, A. Hubert and N. Chaillet, *A new micro-tools exchange principle for micro-manipulation*, [IEEE/RSJ IROS International Conference on Intelligent Robots and Systems](#), Sendai, Japan, September, 2004.

- [C4]* C. Clévy, A. Hubert, J. Agnus and N. Chaillet, *A micromanipulation cell including a microtools changer*, [IWMF International Workshop on Microfactories](#), Shanghai, China, October, 2004.
- [C3]* R. Pérez, J. Agnus, C. Clévy, A. Hubert and N. Chaillet, *2 DoF piezoactuator for micro-manipulation tasks*, [ACTUATOR](#), Bremen, Germany, June, 2004.
- [C2]* J. Agnus, C. Clévy, Y. Urushima, R. Perez, A. Hubert and N. Chaillet, *A micromanipulation station based on a new integrated microprehensile Microrobot On Chip (MMOC)*, [IEEE ISR International Symposium on robotics](#), Paris, France, March, 2004.
- [C1]* J. Agnus, P. D. Lit, C. Clévy and N. Chaillet, *Description and performances of a Four-Degrees-of-Freedom piezoelectric Gripper*, [IEEE ISATP International Symposium on Assembly and Task Planning](#), Besançon, France, July, 2003.

10.5/ COMMUNICATIONS

- [CI1] C. Clévy, B. Komati, A. Kudryavtsev, G. Laurent, K. Rabenoroso, B. Tamadazte, J. Agnus et P. Lutz, *Micro-Assemblage Robotique Automatisé de Composants Optiques Flexibles*, Colloque National de l'AIP-Priméca, La plagne, 2015.
- [CI2] C. Clévy and G. Laurent, *Microrobotique et Vision pour le Micro-Assemblage*, IRCCYN, Nantes, 2013.
- [CI3] B. Komati, C. Clévy et P. Lutz, *Contribution à la Commande Hybride Force/Position pour le Micro-Assemblage*, Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique, Annecy, 2013.
- [CI4] C. Clévy, B. Komati, N. Tan, N. Chaillet and P. Lutz, *Robot Control for Microscale*, Institut Néel, Grenoble, 2013.
- [CI5] A. Bienaimé, C. Clévy and M. Rakotondrabe, *High performance piezoelectric microactuators : toward a new 6 DOFmicroactuated platform*, PiezoNEMS Workshop, 2013.
- [CI6] P. Lutz, M. Gauthier, C. Clévy, S. Dembelé, B. Tamadazte, K. Rabenoroso and N. Piat, *Out of plane MEMS/MOEMS robotic assembly methods*, Journée trans GDR Robotique et MNS-MNF, Besancon, 2012.
- [CI7] C. Clévy, K. Rabenoroso, I. Lungu, N. Tan, P. Lutz, N. Chaillet S. Bargiel et C. Gorecki, *Micro-Assemblage de MOEMS*, Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR), Paris, 2011.
- [CI8] C. Clévy, A. Hubert, N. Chaillet, P. Lutz et Y. Haddab, *Microrobotique et commande pour les micro et nano systèmes*, journées nationales du GDR MNS-MNF, Marseille, 2011.
- [CI9] C. Clévy, K. Rabenoroso, I. Lungu, N. Tan, P. Lutz, N. Chaillet S. Bargiel et C. Gorecki, *Micro-Assemblage de MOEMS*, Institut Néel, Grenoble, 2011.
- [CI10] K. Rabenoroso, C. Clévy, and P. Lutz, *Guiding task based on sensorized grasping during micro-assembly*, Journées Nationales de la Recherche en Robotique, Bourges, Novembre, 2009.
- [CI11] C. Clévy, P. Lutz, K. Rabenoroso, S. Bargiel et C. Gorecki, *Assemblage de microcomposants hybrides*, Présentation d'un projet transverse lors de l'évaluation CNRS de mi-parcours, 2009.
- [CI12] K. Rabenoroso, S. Bargiel, C. Clévy, P.e Lutz, and C. Gorecki, *Micro-assembly of Hybride MOEMS*, GDR Micro Nano Systèmes, Besançon, 2009.

- [CI13] C. Clévy, J. Agnus, M. Rakotondrabe, P. Lutz and N. Chaillet *Piezoelectric microgripper based micromanipulation*, ARRI Institute, University of Texas at Arlington, USA, 2008.
- [CI14] K. Rabenorosoa, C. Clévy, P. Lutz, S. Bargiel, and C. Gorecki, *Micro-assembly of Micro-Optical Benches*, Ateliers LEA d'Arc et Senans, 2008.
- [CI15] C. Clévy, P. Lutz, M. Gauthier and N. Chaillet, *Assembly of microcomponents*, ARRI Institute, University of Texas at Arlington, USA, 2008.

BIBLIOGRAPHIE

- [Abadie et al., 2012] Abadie, J., Piat, E., O'Ster, S., and Boukallel, M. (2012). Modeling and Experimentation of a Passive Low Frequency Nanoforce Sensor Based on Diamagnetic Levitation. *Sensors and Actuators A : Physical*, 173 :227–237.
- [Abbott et al., 2007] Abbott, J. J., Nagy, Z., Beyeler, F., and Nelson, B. J. (2007). Robotics in the small, part i : Microrobotics. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14(2) :92103.
- [Abrahamians et al., 2013] Abrahamians, J. O., Sauvet, B., Maris, J. P., Braive, R., and Régnier, S. (2013). Nanorobotic system for in situ stiffness measurements on membranes. *IEEE Transactions on Robotics*, 30 :119–124.
- [Agnus et al., 2013] Agnus, J., Chaillet, N., Clévy, C., Dembélé, S., Gauthier, M., Haddab, Y., Laurent, G., Lutz, P., Piat, N., Rabenorosoa, K., Rakotondrabe, M., and Tamadazte, B. (2013). Robotic microassembly and micromanipulation at femto-st. *Journal of Molecular Biology Research (JMBR)*, 8(2) :91–106.
- [Agnus et al., 2005] Agnus, J., Nectoux, P., and Chaillet, N. (2005). Overview of microgrippers and design of a micromanipulation station based on a mmoc microgripper. In *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pages pp. 117–123.
- [Aktakka et al., 2013] Aktakka, E., Peterson, R., and AokiNajafi, K. (2013). A 3-dof piezoelectric micro vibratory stage based on bulk-pzt/silicon crab-leg suspensions. In *EEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pages pp. 576–579.
- [Aljasem et al., 2011] Aljasem, K., Froehly, L., Seifert, A., and Zappe, H. (2011). Scanning and tunable micro-optics for endoscopic optical coherence tomography. *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, 20(6) :1462–1472.
- [Aljasem et al., 2008] Aljasem, K., Werber, A., Seifert, A., and Zappe, H. (2008). Fiber optic tunable probe for endoscopic optical coherence tomography. *Journal of Optics A : Pure and Applied Optics*, 10(4) :044012.
- [Andersen et al., 2008] Andersen, K., Carlson, K., Petersen, D., Mølhave, K., Eichhorn, V., Fatikow, S., and Bøggil, P. (2008). Electrothermal microgrippers for pick-and-place operations. *Microelectronic Engineering*, 85(5-6) :1128–1130.
- [Anis et al., 2010] Anis, Y., Holl, M., and Meldrum, D. (2010). Automated selection and placement of single cells using vision-based feedback control. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 7 :598 – 606.
- [Aoki, 2003] Aoki, K. (2003). Microassembly of semiconductor three-dimensional photonic crystals. *Nature materials*, 2.2 :117–121.
- [Athanasίου and Bellouard, 2015] Athanasίου, C. and Bellouard (2015). A monolithic micro-tensile tester for investigating silicon dioxide polymorph micromechanics, fabricated and operated using a femtosecond laser. *Micromachines*, 6(9) :1365–1386.
- [Avci et al., 2015] Avci, E., Ohara, K., Nguyen, C., Theeravithayangkura, C., Kojima, M., Tanikawa, T., Mae, Y., and Arai, T. (2015). High-speed automated manipulation of microobjects

- using a two-fingered microhand. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(2) :1070–1079.
- [Bahadur et al., 2005] Bahadur, I., Mills, J., and Sun, Y. (2005). Design of a mems-based resonant force sensor for compliant, passive microgripping. *IEEE International Conference Mechatronics and Automation*, 1 :77,82.
- [Ballas, 2007] Ballas, R. (2007). *Piezoelectric Multilayer Beam Bending Actuators : Static and Dynamic Behavior and Aspects of Sensor Integration*. Springer.
- [Baranski, 2015] Baranski, M. (2015). Micro-optical design of a three-dimensional microlens scanner for vertically integrated micro-opto-electro-mechanical systems. *Applied Optics*, 54(22) :6924–34.
- [Bellouard, 2009] Bellouard, Y. (2009). *Microrobotics : Methods and Applications*. CRC Press.
- [Bellouard et al., 1999] Bellouard, Y., Lehnert, T., Bidaux, J., Sidler, T., Clavel, R., and Gotthardt, R. (1999). Local annealing of complex mechanical devices : a new approach for developing monolithic micro-devices. *Materials Science and Engineering*, 273-275 :795–798.
- [Berkelman et al., 2003] Berkelman, P. J., Whitcomb, L. L., Taylor, R. H., and Jensen, P. (2003). A Miniature Microsurgical Instrument Tip Force Sensor for Enhanced Force Feedback During Robot-Assisted Manipulation. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 19(5) :917–922.
- [Beyeler et al., 2009] Beyeler, F., Muntwyler, S., and Nelson, B. J. (2009). A Six-Axis MEMS Force and Torque Sensor With Micro-Newton and Nano-Newtonmeter Resolution. *Journal Of Microelectromechanical Systems*, 18(2) :433–441.
- [Beyeler et al., 2007] Beyeler, F., Neild, A., Oberti, S., D.J. Bell, Y. S., Dual, J., and Nelson, B. (2007). Monolithically fabricated microgripper with integrated force sensor for manipulating microobjects and biological cells aligned in an ultrasonic field. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 16(1) :7–15.
- [Bideaux et al., 2003] Bideaux, E., Smaoui, M., Brun, X., and Thomasset, D. (2003). Design of a compliant positioning control using an inverse method. In *Bath Workshop on Power Transmission and Motion Control*.
- [Binnig et al., 1986] Binnig, G., Quate, C., and Gerber, C. (1986). Atomic force microscope. *Physical Review Letters*, 56(9) :930–933.
- [Blom et al., 1989] Blom, F., Bouwstra, S., Fluitman, J., and Elwenspoek, M. (1989). Resonating silicon beam force sensor. *Sensors and Actuators*, 17(34) :513519.
- [Boudaoud et al., 2015] Boudaoud, M., Faria, M. G. D., Haddab, Y., Haliyo, S., Gorrec, Y. L., Lutz, P., and R', S. (2015). Robust microscale grasping through a multimodel design : synthesis and real time implementation. *Control Engineering Practic*, 39 :12–22.
- [Boudaoud et al., 2011] Boudaoud, M., Haddab, Y., Gorrec, Y. L., and Lutz, P. (2011). Noise characterization in millimeter sized micromanipulation systems. *Mechatronics*, 21(6) :1087–1097.
- [Brethé, 2011] Brethé, J. (2011). Granular stochastic modeling of robot micrometric precision. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 4066–4071.
- [Butt et al., 2005] Butt, H., Cappela, B., and Kappl, M. (2005). Force measurements with the atomic force microscope : technique, interpretation and applications. *Surf. Sci. Rep*, page p. 1152.
- [C. Clévy and Chaillet, 2011] C. Clévy, M. R. and Chaillet, N., editors (2011). *Signal Measurement and Estimation Techniques for Micro and Nanotechnology*. Springer.

- [Cao et al., 2004] Cao, H., Schmidt, V. H., Zhang, R., Cao, W., and Luo, H. (2004). Elastic, piezoelectric, and dielectric properties of 0.58 pb (mg1/3nb2/3) o3-0.42 pbtio3 single crystal. *Journal of applied physics*, 96(1) :549–554.
- [Cao and Chen, 2014] Cao, Y. and Chen, X. (2014). Disturbance-observer-based sliding-mode control for a 3-dof nanopositioning stage. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(3) :924–931.
- [Cappelleri et al., 2011] Cappelleri, D., Piazza, G., and Kumar, V. (2011). A two dimensional vision-based force sensor for microrobotic applications. *Sensors & Actuators : A Physical*, 171(2) :340–351.
- [Carrozza et al., 2000] Carrozza, M. C., Eisinger, A., Menciassi, A., Campolo, D., Micera, S., and Dario, P. (2000). Towards a force-controlled microgripper for assembling biomedical microdevices. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 10(2) :271.
- [Chaillet and Régnier, 2010] Chaillet, N. and Régnier, S. (2010). *Microrobotics for Micromanipulation*. Wiley-ISTE.
- [Chen et al., 2009] Chen, T., Chen, L., Liu, B., Wang, J., and Li, X. (2009). Design of a Four-Arm Structure MEMS Gripper Integrated with Sidewall Force Sensor. In *4th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*.
- [Chen and Li, 2015] Chen, X. and Li, W. (2015). A monolithic self-sensing precision stage : Design, modeling, calibration, and hysteresis compensation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(2) :812–823.
- [Choi et al., 2014] Choi, J., Qiu, Z., Rhee, C.-H., Wang, T., and Oldham, K. (2014). A three-degree-of-freedom thin-film pzt-actuated microactuator with large out-of-plane displacement. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 24(7) :075017.
- [Choi et al., 2001] Choi, K. B., Kim, S. H., and Choi, B. W. (2001). Moving-magnet type precision miniature platform for fine positioning and compliant motion. *Mechatronics*, 11 :921937.
- [Clark et al., 2015] Clark, L., Shirinzadeh, B., Tian, Y., and Oetomo, D. (2015). Laser-based sensing, measurement, and misalignment control of coupled linear and angular motion for ultrahigh precision movement. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(1) :84–92.
- [Clévy et al., 2008] Clévy, C., Hubert, A., and Chaillet, N. (2008). Flexible micro-assembly system equipped with an automated tool changer. *J. Micro-Nano Mech*, 4 :pp. 5972.
- [Clévy et al., 2014] Clévy, C., Lungu, I., Rabenorosoa, K., and Lutz, P. (2014). Positioning accuracy characterization of assembled microscale components for micro-optical benches. *Assembly Automation*, 34(1) :68–77.
- [Clévy et al., 2011] Clévy, C., Rakotondrabe, M., and Chaillet, N. (2011). *Signal Measurement and Estimation Techniques for Micro and Nanotechnology*. Springer.
- [CSM,] CSM. Nanotribometer.
- [Cullinan et al., 2012] Cullinan, M. A., Panas, R. M., and L., C. M. (2012). A Multi-Axis MEMS Sensor with Integrated Carbon Nanotube-Based Piezoresistors for Nanonewton Level Force Metrology. *Nanotechnology*, 23.
- [Dagnino et al., 2015] Dagnino, G., Mattos, L. S., and Caldwell, D. G. (2015). A vision-based system for fast and accurate laser scanning in robot-assisted phonomicrosurgery. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 10(2) :217–229.
- [Danescu et al., 2015] Danescu, A., Chevalier, C., Artinyan, R., Regreny, P., Grenet, G., Callard, S., and Leclercq, J. L. (2015). Self-assembly'micro-origami'photon cages as hollow micro-resonators. In *SPIE Microtechnologies*, volume 952000-952000.

- [Das et al., 2008a] Das, A., Sin, J., Popa, D., and Stephanou, H. (2008a). Design and manufacturing of a fourier transform microspectrometer. *IEEE Conference on Nanotechnology*, pages 837–840.
- [Das et al., 2007a] Das, A., Zhang, P., Lee, W., Popa, D., and Stephanou, H. (2007a). Multiscale, deterministic micro-nano assembly system for construction of on-wafer microrobots. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- [Das et al., 2009] Das, A. N., Popa, D., Sin, J., and Stephanou, H. (2009). Precision alignment and assembly for a fourier transform microspectrometer. *Journal of Micro-Nano Mechatronics*, 5 :15–28.
- [Das et al., 2008b] Das, A. N., Sin, J., Popa, D. O., and Stephanou, H. E. (2008b). On the precision alignment and hybrid assembly aspects in manufacturing of a microspectrometer. In *IEEE Conference on Automation Science and Engineering*.
- [Das et al., 2007b] Das, A. N., Zhang, P., Lee, W. H., Stephanou, H., and Popa, D. (2007b). μ^3 : Multiscale, deterministic micro-nano assembly system for construction of on-wafer microrobots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 461–466.
- [Davis et al., 2006] Davis, M., Damjanovic, D., and Setter, N. (2006). Electric-field-, temperature-, and stress-induced phase transitions in relaxor ferroelectric single crystals. *Physical Review B*, 73(1) :014115.
- [de Lit et al., 2004] de Lit, P., Agnus, J., Clévy, C., and Chaillet, N. (2004). A four-degree-of-freedom microprehensile microrobot on chip. *Assembly and Automation*, 24(1) :33–42.
- [Dechev et al., 2004a] Dechev, N., Cleghorn, W., and Mills, J. (2004a). Microassembly of 3-d microstructures using a compliant, passive microgripper. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 13(2) :176–189.
- [Dechev et al., 2004b] Dechev, N., Mills, J., and Cleghorn, W. (2004b). Mechanical fastener designs for use in the microassembly of 3d microstructures. *Proceeding of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pages 19–21.
- [Descour et al., 2002] Descour, M. R., Kken, A. H. O., Rogers, J. D., and Liang, C. (2002). Toward the development of miniaturized imaging systems for detection of pre-cancer. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38 :122130.
- [Devasia et al., 2007] Devasia, S., Eleftheriou, E., and Moheimani, S. O. R. (2007). A survey of control issues in nanopositioning. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 15(5) :802–823.
- [Doll and Pruitt, 2012] Doll, J. and Pruitt, B. (2012). High-bandwidth piezoresistive force probes with integrated thermal actuation. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 22(9) :095012.
- [Driesen et al., 2005] Driesen, M., Varidel, T., Regnier, S., and Breguet, J. M. (2005). Micro manipulation by adhesion with two collaborating mobile micro robots. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15 :259267.
- [Drumond and Richetti, 2007] Drumond, C. and Richetti, P. (2007). *Fundamentals of friction and wear*, chapter Surface forces apparatus in nanotribology, page 1533. Springer.
- [Duc et al., 2008] Duc, T., Lau, G., Creemer, J., and Sarro, P. (2008). Electrothermal microgripper with large jaw displacement and integrated force sensors. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 17(6) :1546,1555.
- [Eielsen et al., 2014] Eielsen, A., Vagia, M., Gravdahl, J., and Pettersen, K. (2014). Damping and tracking control schemes for nanopositioning. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(2) :432–444.

- [Enikov and Nelson, 2000] Enikov, E. and Nelson, B. (2000). Three-dimensional microfabrication for a multi-degree-of-freedom capacitive force sensor using fibre-chip coupling. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 10.
- [Espinosa et al., 2014] Espinosa, A., Zhang, X., Rabenorosoa, K., Cl'evy, C., Samuelson, S. R., Komati, B., Xie, H., and Lutz, P. (2014). Piston motion performance analysis of a 3dof electrothermal mems scanner for medical applications. *International Journal of Optomechanics*, 8(3).
- [Estevez et al., 2011] Estevez, P., Bank, J., Porta, M., Wei, J., Sarro, P., Tichem, M., and Staufer, U. (2011). 6 DOF Force and Torque Sensor for Micro-Manipulation Applications. *Procedia Engineering*, 25 :39–42.
- [Faria et al., 2015] Faria, M. G. D., Haddab, Y., Gorrec, Y. L., and Lutz, P. (2015). Review of scientific instruments. *Influence of mechanical noise inside a scanning electron microscope*, 86(4) :045105.
- [Feddema and Simon, 1998] Feddema, J. T. and Simon, R. W. (1998). isual servoing and cad-driven microassembly. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 5(4) :1824.
- [FemtoTools,] FemtoTools. FT-S Microforce Sensing Probe.
- [Fraser et al., 1998] Fraser, S., Attia, M., and Osman, M. (1998). Modelling, identification and control of thermal deformation of machine tool structures, part 2 : Generalized transfer functions. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 120(3) :632–639.
- [Freund and Suresh, 2004] Freund, L. and Suresh, S. (2004). *Thin film materials : stress, defect formation and surface evolution*. Cambridge University Press.
- [FT-G Microgripper,] FT-G Microgripper. <http://www.femtotools.com/index.php?id=products-g>.
- [FT-S Microforce Sensing Probe,] FT-S Microforce Sensing Probe. <http://www.femtotools.com/index.php?id=products-s>.
- [Gauthier and Régnier, 2010] Gauthier, M. and Régnier, S. (2010). *Robotic Microassembly*. Wiley.
- [Ge et al., 2014] Ge, Q., Dunn, C., Qi, H., and Dunn, M. (2014). Active origami by 4d printing. *Smart Materials and Structures*, 23(9) :094007.
- [Genevaux et al., 2014] Genevaux, P., Salsi, M., Boutin, A., Verluise, F., Sillard, P., and Charlet, G. (2014). Comparison of qpsk and 8-qam in a three spatial modes transmission. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26 :414–417.
- [Greminger and Nelson, 2004] Greminger, M. A. and Nelson, B. J. (2004). Vision-Based Force Measurement. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(3) :290–298.
- [Griffith and Akella, 2005] Griffith, E. and Akella, S. (2005). Coordinating multiple droplets in planar array digital microfluidic systems. *International Journal of Robotics Research*, 24(11) :933–949.
- [Grossard et al., 2009] Grossard, M., Rotinat-Libersa, C., Chaillet, N., and Boukallel, M. (2009). Mechanical and control-oriented design of a monolithic piezoelectric microgripper using a new topological optimization method. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 14(1) :32–45.
- [Gu et al., 2014] Gu, G., Zhu, L., Su, C., Ding, H., and Fatikow, S. (2014). Proxy-based sliding-mode tracking control of piezoelectric-actuated nanopositioning stages. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, PP(99) :1–10.

- [Guelpa et al., 2015] Guelpa, V., Laurent, G. J., Sandoz, P., and Clévy, C. (2015). Vision-based microforce measurement with a large range-to-resolution ratio using a twin-scale pattern. *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, To be published, DOI :10.1109/TMECH.2015.2407053.
- [Guelpa et al., 2014] Guelpa, V., Laurent, G. L., Sandoz, P., Zea, J. G., and Clévy, C. (2014). Subpixelic measurement of large 1d displacements : principle, processing algorithms, performances and software. *Sensors*, 14(3) :5056–5073.
- [Guo et al., 2002] Guo, Y., Luo, H., Chen, K., Xu, H., Zhang, X., and Yin, Z. (2002). Effect of composition and poling field on the properties and ferroelectric phase-stability of pb (mg₁/3nb₂/3) o₃-pbtio₃ crystals. *Journal of applied physics*, 92 :6134–6138.
- [Hackenberger et al., 2008] Hackenberger, W., Luo, J., Jiang, X., Snook, K., Rehrig, P., and Ye, Z. (2008). Handbook of advanced dielectric, piezoelectric and ferroelectric materials.
- [Hartley and Zisserman, 2003] Hartley, R. and Zisserman, A. (2003). *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge University Press.
- [Hiemstra et al., 2014] Hiemstra, D., Parmar, G., and Awtar, S. (2014). Performance tradeoffs posed by moving magnet actuators in flexure-based nanopositioning. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(1) :201–212.
- [Hogan, 1985] Hogan, N. (1985). Impedance control - an approach to manipulation. i - theory. ii - implementation. iii - applications. *ASME Transactions Journal of Dynamic Systems and Measurement Control B*, 107 :1–24.
- [Hoover and Fearing, 2007] Hoover, A. and Fearing, R. (2007). Rapidly prototyped orthotweezers for automated microassembly. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 812,819, Rome, Italy.
- [Ishizaki et al., 2013] Ishizaki, K., Koumura, M., Suzuki, K., Gondaira, K., , and Noda, S. (2013). Realization of three-dimensional guiding of photons in photonic crystals. *Nature Photonics*, 7 :133–137.
- [Ivan et al., 2010] Ivan, I. A., Rakotondrabe, M., Agnus, J., Bourquin, R., Chaillet, N., Lutz, P., Poncot, J.-C., Duffait, R., and Bauer, O. (2010). Comparative material study between pzt ceramic and newer crystalline pmn-pt and pzn-pt materials for composite bimorph actuators. *Review on Advanced Materials Science (RAMS)*, 24(15-16) :1–9.
- [Jaffe, 2012] Jaffe, B. (2012). *Piezoelectric ceramics*, volume 3. Elsevier.
- [Jagadish and Pearton, 2011] Jagadish, C. and Pearton, S. N., editors (2011). *Zinc oxide bulk, thin films and nanostructures : processing, properties, and applications*. Elsevier.
- [Jang et al., 2007] Jang, J., Yang, M., and Schatz, G. (2007). Microscopic origin of the humidity dependence of the adhesion force in atomic force microscopy. *J. Chem. Phys*, 126 :pp. 16.
- [Janphuang et al., 2014] Janphuang, P., Lockhart, R., Uffer, N., Braind, D., and Rooij, N. C. (2014). Vibrational piezoelectric energy harvesters based on thinned bulk pzt sheets fabricated at the wafer level. *Sensors and Actuators A : Physical*, 210 :pp. 1–9.
- [Kania et al., 2006] Kania, A., Słodczyk, A., and Ujma, Z. (2006). Flux growth and characterization of (1- x) pbmg₁/3 nb₂/3 o₃-xpbtio₃ single crystals. *Journal of crystal growth*, 289(1) :134–139.
- [Kanno et al., 2003] Kanno, I., Kotera, H., and Wasa, K. (2003). Measurement of transverse piezoelectric properties of pzt thin films. *sensors and Actuators A : Physical*, 107(1) :pp. 68–74.
- [Kern,] Kern. Precision Balance PBS 620-3M.

- [Khadraoui et al., 2014] Khadraoui, S., BarRakotondrabe, M., and Lutz, P. (2014). Optimal design of piezoelectric cantilevered actuators with guaranteed performances by using interval techniques. *IEEE/ASME - Transactions on Mechatronics*, 19(5) :1660–1668.
- [Kim et al., 2008] Kim, K., Liu, X., Zhang, Y., and Sun, Y. (2008). Nanonewton force-controlled manipulation of biological cells using a monolithic mems microgripper with two-axis force feedback. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18(5) :055013.
- [Kim et al., 2010] Kim, K.-B., Hsu, D. K., Ahn, B., Kim, Y.-G., and Barnard, D. J. (2010). Fabrication and comparison of pmn-pt single crystal, pzt and pzt-based 1-3 composite ultrasonic transducers for nde applications. *Ultrasonics*, 50(8) :790–797.
- [Koh et al., 2011] Koh, K. H., Kobayashi, T., and Lee, C. (2011). A 2-d mems scanning mirror based on dynamic mixed mode excitation of a piezoelectric pzt thin film s-shaped actuator. *Opt. Express*, 19(15) :pp. 13812–13824.
- [Komati et al., 2014a] Komati, B., Agnus, J., Clévy, C., and Lutz, P. (2014a). Prototyping of a highly performant and integrated piezoresistive force sensor for microscale applications. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 24(3) :035018.
- [Komati et al., 2014b] Komati, B., Clévy, C., Rakotondrabe, M., and Lutz, P. (2014b). Dynamic force/position modeling of a one-dof smart piezoelectric micro-finger with sensorized end-effector. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 1474–1479.
- [Kristiansen et al., 2008] Kristiansen, K., McGuiggan, P., Carver, G., Meinhart, C., and Israelachvili, J. (2008). 3D Force and Displacement Sensor for SFA and AFM Measurements. *Langmuir*, 24 :1541–1549.
- [Krulwich, 1998] Krulwich, D. (1998). Temperature integration model and measurement point selection for thermally induced machine tool errors. *Mechatronics*, 8 :395–412.
- [Lafitte, 2012] Lafitte, N. (2012). *Modeling and control of MEMS tweezers for the characterizations of enzymatic reactions on DNA molecules*. PhD thesis, Université de Franche-Comté.
- [Lambert, 2007] Lambert, P. (2007). *Capillary Forces in Microassembly : Modeling, Simulation, Experiments, and Case Study*. Springer, 2007 edition edition.
- [Lang, 2008] Lang, D. (2008). *A Study on Micro-gripping Technologies*. PhD thesis, University of Southern Denmark, Denmark.
- [Leckband, 2008a] Leckband, D. (2008a). *Handbook of molecular force spectroscopy*, chapter Surface force apparatus measurements of molecular forces in biological adhesion, page 122. Springer.
- [Leckband, 2008b] Leckband, D. (2008b). *Surface force apparatus measurements of molecular forces in biological adhesion*. Springer.
- [Lenders et al., 2012] Lenders, C., Gauthier, M., Cojan, R., and ChenLambert, P. C. Y. (2012). Three-dof microrobotic platform based on capillary actuation. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(5) :1157–1161.
- [Li et al., 2009] Li, J., Zhang, W., Yang, G., Tu, S., and Chen, X. (2009). Thermal-error modeling for complex physical systems : The-state-of-the-arts review. *INT J ADV MANUF TECH*, 42 :168–179.
- [Li et al., 2007] Li, M., Tang, H., and Roukes, R. (2007). Ultra-sensitive nems-based cantilevers for sensing, scanned probe and very high-frequency applications. *Nature nanotechnology*, 2(2) :114–120.
- [Li and Xu, 2009] Li, Y. and Xu, Q. (2009). Design and analysis of a totally decoupled flexure-based xy parallel micromanipulator. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(3) :pp. 645–657.

- [Low and Guo, 1995] Low, T. and Guo, W. (1995). Modeling of a three-layer piezoelectric bimorph beam with hysteresis. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 4(4) :230–237.
- [Lu et al., 2006] Lu, Z., Chen, P. C. Y., Ganapathy, A., Zhao, G., Nam, J., Yang, G., Burdet, E., Teo, C., Meng, Q., and Lin, W. (2006). A force-feedback control system for micro-assembly. *J. Micromechanics Microeng*, 16 :pp. 18611868.
- [Lubrano, 2011] Lubrano, E. (2011). *Calibration of ultra-high-precision robots operating in an unsteady environment*. PhD thesis, EPFL, Lausanne.
- [Lubrano and Clavel, 2008] Lubrano, E. and Clavel, R. (2008). Thermal behavior of an ultra high-precision linear axis operating in industrial environment. In *9th International Workshop on Research and Education in Mechatronics*, pages 151–152.
- [Luo et al., 2009] Luo, L., Li, W., Zhu, Y., and Wang, J. (2009). Growth and characteristics of mn-doped pmn-pt single crystals. *Solid State Communications*, 149(25) :978–981.
- [Madou, 2002] Madou, M. J. (2002). *Fundamentals of microfabrication : the science of miniaturization*. CRC Press.
- [Madou, 2011] Madou, M. J. (2011). *Manufacturing techniques for microfabrication and nanotechnology (Vol. 2)*. CRC.
- [Majcherczyk et al., 2014] Majcherczyk, N., Rabenorosoa, K., Cl'evy, C., Mincheva, R., Raquez, J. M., Viallon, M., Mastrangeli, M., and Lambert, P. (2014). Experimental characterization of a droplet-actuated microassembly platform : Towards closed-loop control. In Besan, F., editor, *IEEE/ASME AIM International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*.
- [Manzardo, 2002] Manzardo, O. (2002). *Micro-sized Fourier Spectrometers*. PhD thesis, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL).
- [Marchand et al., 2005] Marchand, E., Spindler, F., and Chaumette, F. (2005). Visp for visual servoing : a generic software platform with a wide class of robot control skills. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 12(4) :4052.
- [Matsumoto et al., 2010] Matsumoto, A., Yoshida, K., and Maeda, Y. (2010). *Design of a Desktop Microassembly Machine and its Industrial Application to Microsolder Ball Manipulation, in Robotic Microassembly*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- [Mattos and Caldwell, 2009] Mattos, L. and Caldwell, D. (2009). A fast and precise micropipette positioning system based on continuous camera-robot recalibration and visual servoing. In *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, pages 609–614, Bangalore, India.
- [Melpignano et al., 2014] Melpignano, G., Schaap, A., and AnselBellouard, Y. (2014). Design and fabrication of a prototype actuator for fourier transform interferometry. In Publishing, S. I., editor, *Progress in Optomechatronic Technologies*, pages pp. 97–105.
- [Millet et al., 2004] Millet, O., Bernardoni, P., Rier, S., Bidaud, P., Tsitsiris, E., Collard, D., and Buchaillot, L. (2004). Electrostatic actuated micro gripper using an amplification mechanism. *Sensors and Actuators A : Physical*, 114(2) :371–378.
- [Miyagawa et al., 2013] Miyagawa, C., Kobayashi, T., Taishi, T., and Hoshikawa, K. (2013). Demonstration of crack-free c-axis sapphire crystal growth using the vertical bridgman method. *Journal of Crystal Growth*, 372 :95–99.
- [Moddemeijer, 1991] Moddemeijer, R. (1991). On the determination of the position of extrema of sampled correlators. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 39(1) :216–219.
- [Molhave and Hansen, 2005] Molhave, K. and Hansen, O. (2005). Electro-thermally actuated microgrippers with integrated force-feedback. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15(6) :1265.

- [Mouhib et al., 2009] Mouhib, O., Jardin, A., Marquis-Favre, W., Bideaux, E., and Thomasset, D. (2009). Optimal control problem in bond graph formalism. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(1) :240–256.
- [Mullem et al., 1991] Mullem, C. V., Blom, F., Fluitman, J., and Elwenspoek, M. (1991). Piezoelectrically driven silicon beam force sensor. *Sensors and Actuators A : Physical*, 26(1) :379–383.
- [Muntwyler et al., 2010] Muntwyler, S., Beyeler, F., and Nelson, B. (2010). Three-axis micro-force sensor with sub-micro-newton measurement uncertainty and tunable force range. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20(2) :025011.
- [Nalwa, 2002] Nalwa, H., editor (2002). *Handbook of thin film materials*. Academic Press.
- [Nesterov, 2007] Nesterov, V. (2007). Facility and Methods for the Measurement of Micro and Nano Forces in the Range Below 10^5 N with a Resolution of 10^{12} N (Development Concept). *Measurement Science and Technology*, 18 :360–366.
- [Noell et al., 2002] Noell, W., Clerc, P.-A., Dellmann, L., Guldemann, B., Herzig, H.-P., Manzardo, O., Marxer, C., Weible, K., Dandliker, R., and de Rooij, N. (2002). Applications of soi-based optical mems. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 8(1) :148–154.
- [Onal et al., 2015] Onal, C., Tolley, M., Wood, R., and Rus, D. (2015). Origami-inspired printed robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(5) :pp.2214–2221.
- [Ousaid et al., 2014] Ousaid, A. M., Millet, G., Haliyo, S., Régnier, S., and Hayward, V. (2014). Feeling what an insect feels. *PLoS ONE*, 9(10) :e10889.
- [Park et al., 2010] Park, S., Doll, J., and Pruitt, B. (2010). Piezoresistive cantilever performancepart i : Analytical model for sensitivity. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 19(1) :137–148.
- [PCE Inst., a] PCE Inst. Force Gauge PCE-FG 10K.
- [PCE Inst., b] PCE Inst. Precision Force Gauge PCE-FG 50.
- [Peng and Chen, 2013] Peng, J. and Chen, X. (2013). A survey of modeling and control of piezoelectric actuators. *Modern Mechanical Engineering*, 3(1) :1–20.
- [Peng and Chen, 2014] Peng, J. and Chen, X. (2014). Integrated pid-based sliding mode state estimation and control for piezoelectric actuators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(1) :88–99.
- [Peraza-Hernandez et al., 2014] Peraza-Hernandez, E., Hartl, D., Jr, R. M., and Lagoudas, D. (2014). Origami-inspired active structures : a synthesis and review. *Smart Materials and Structures*, 23(9) :094001.
- [Pérez et al., 2005] Pérez, R., Agnus, J., Clévy, C., Hubert, A., and Chaillet, N. (2005). Modeling, fabrication, and validation of a high-performance 2-dof piezoactuator for micromanipulation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 10(2) :161–171.
- [Piriyanont et al., 2015] Piriyanont, B., Fowler, A., and Moheimani, S. (2015). Force-controlled mems rotary microgripper. *Journal of Microelectromechanical Systems*, PP(99) :1–9.
- [Piriyanont et al., 2013] Piriyanont, B., Moheimani, S., and Bazaei, A. (2013). Design and control of a mems micro-gripper with integrated electro-thermal force sensor. *3rd Australian Control Conference (AUCC)*, pages 479–484.
- [Popa et al., 2009] Popa, D., Murthy, R., and Das, A. (2009). M3-deterministic, multiscale, multirobot platform for microsystems packaging : Design and quasi-static precision evaluation. *IEEE T. Automation Science and Engineering*, 6(2) :345–361.

- [Popa and Stephanou, 2004] Popa, D. O. and Stephanou, H. (2004). Micro and mesoscale robotic assembly. *Journal of manufacturing processes*, 6(1) :52–71.
- [Precision Force Gauge PCE-FG 50,] Precision Force Gauge PCE-FG 50. [http ://www.industrial-needs.com/technical-data/force-gauge-pce-fg.htm](http://www.industrial-needs.com/technical-data/force-gauge-pce-fg.htm).
- [Precision Force Gauge PGE-FG 1K,] Precision Force Gauge PGE-FG 1K. [http ://www.industrial-needs.com/technical-data/force-meter-pce-sh.htm](http://www.industrial-needs.com/technical-data/force-meter-pce-sh.htm).
- [Quenzer et al., 2011] Quenzer, H., Drechsler, U., Sebastian, A., Marauska, S., and Wagner, B. (2011). Fabrication of conducting afm cantilevers with aln-based piezoelectric actuators. *Procedia Engineering*, 25 :665–6683.
- [Raibert and Craig, 1981] Raibert, M. and Craig, J. (1981). Hybrid position/force control of manipulators. *Transactions of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 102 :126–133.
- [Rajagopalan et al., 2010a] Rajagopalan, J., Tofangchi, A., and Saif, M. (2010a). Linear high-resolution biomems force sensors with large measurement range. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 19(6) :1380–1389.
- [Rajagopalan et al., 2010b] Rajagopalan, J., Tofangchi, A., Taher, M., and Saif, A. (2010b). Linear High-Resolution BioMEMS Force Sensors With Large Measurement Range. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 19(6) :1380–1389.
- [Rakotondrabe et al., 2010] Rakotondrabe, M., Clévy, C., Rabenorofoa, K., and Ncir, K. (Toronto, Canada, August 2010). Presentation, force estimation and control of an instrumented platform dedicated to automated micromanipulation tasks. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pages 722 – 727.
- [Rakotondrabe et al., 2009] Rakotondrabe, M., Haddab, Y., and Lutz, P. (2009). Quadrilateral modelling and robust control of a nonlinear piezoelectric cantilever. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 17(3) :528–539.
- [Rakotondrabe and Ivan, 2011] Rakotondrabe, M. and Ivan, I. (2011). Development and force/position control of a new hybrid thermo-piezoelectric microgripper dedicated to micro-manipulation tasks. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 8(4) :824–834.
- [Rakotondrabe et al., 2015] Rakotondrabe, M., Ivan, I., Khadraoui, S., Lutz, P., and Chaillet, N. (2015). Simultaneous displacement/force self-sensing in piezoelectric actuators and applications to robust control. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(2) :519–531.
- [Reddy et al., 2010] Reddy, A., Maheshwari, N., Sahu, D., and Ananthasuresh, G. (2010). Miniature compliant grippers with vision-based force sensing. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(5) :867–877.
- [Régner, 2015] Régner, S. (5 Février 2015). Microrobotics, microrobots : interactive systems for small scales. In *Présentation á la journée scientifique des 10 ans de l'institut Femto-st*.
- [Requicha et al., 2009] Requicha, A., Arbuckle, D., Mokaberi, B., and Yun, J. (2009). Algorithms and software for nanomanipulation with atomic force microscopes. *International Journal of Robotics Research*, 28(4) :512–522.
- [Sandoz et al., 303] Sandoz, P., Zeggari, R., Froelhy, L., Prétet, J., and Mougin, C. (293-303). Position referencing in optical microscopy thanks to sample holders with out-of-focus encoded patterns. In *Journal of Microscopy*, volume 255.
- [Sergeyev et al., 2015] Sergeyev, A., Geiss, R., Solntsev, A. S., Sukhorukov, A. A., Schrempel, F., Pertsch, T., and Grange, R. (2015). Enhancing guided second-harmonic light in lithium niobate nanowires. *ACS Photonics*, 2 :687–691.

- [Shan and Leang, 2012] Shan, Y. and Leang, K. K. (2012). Design and control for high-speed nanopositioning : Serial-kinematic nanopositioners and repetitive control for nanofabrication. *IEEE Control Systems*, 33(6) :86–105.
- [Shen et al., 2014] Shen, Z.-Y., Tang, Y., Zhang, S., Luo, J., Li, Y., and Shrout, T. R. (2014). Enhanced piezoelectric activity and temperature stability of [111]-oriented orthorhombic 0.68 pb (mg 1/3 nb 2/3) o 3–0.32 pbtio 3 single crystals by domain size engineering. *Scripta Materialia*, 72 :17–20.
- [Simson et al., 1998a] Simson, D., Ziemann, F., Strigl, M., and Merkel, R. (1998a). Micropipet-based pico force transducer : In depth analysis and experimental verification. *Biophysical Journal*, 74(4) :2080–2088.
- [Simson et al., 1998b] Simson, D. A., Ziemann, F., Strigl, M., and Merkel, R. (1998b). Micropipet-Based Pico Force Transducer : In Depth Analysis and Experimental Verification. *Biophysical Journal*, 74 :2080–2088.
- [Singh and Singhose, 2002] Singh, T. and Singhose, W. (2002). Tutorial on input shaping/time delay control of maneuvering flexible structures. In *American Control Conference*, pages 1717–1731.
- [Smits et al., 1991] Smits, J., Dalke, S., and Cooney, T. (1991). The constituent equations of piezoelectric bimorphs. *Sensors and Actuators A : Physical*, 28(1) :41–61.
- [Sun and Kim, 2014] Sun, Y. and Kim, K. (2014). Mems-based micro and nano grippers with two axis force sensors. *U.S. Patent No 8,623,222*.
- [Sun and Nelson, 2002] Sun, Y. and Nelson, B. (2002). Biological cell injection using an autonomous microrobotic system. *International Journal of Robotics Research*, 21(10-11) :861–868.
- [Sun et al., 2002] Sun, Y., Nelson, B., Potasek, D., and Enikov, E. (2002). A bulk microfabricated multi-axis capacitive cellular force sensor using transverse comb drives. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 12(6) :832.
- [Tamadazte, 2009] Tamadazte, B. (2009). *Vision 3D et Commande par asservissements visuels pour la micromanipulation et le micro-assemblage de MEMS*. PhD thesis, Université de Franche-Comté.
- [Tamadazte et al., 2009] Tamadazte, B., Arnould, T., Dembélé, S., Fort-Piat, N. L., and Marchand, E. (2009). Real-time vision-based microassembly of 3d mems. In *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*.
- [Tamadazte et al., 2010] Tamadazte, B., Dembélé, S., and Fort-Piat, N. L. (2010). Cad model-based tracking and 3d visual-based control for mems microassembly. *International Journal of Robotics Research*, 29(11) :1416–1434.
- [Tamadazte et al., 2011] Tamadazte, B., Piat, N., and Dembélé, S. (2011). Robotic micromanipulation and microassembly using monoview and multiscale visual servoing. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 16 , Issue : 2 :277 – 287.
- [Tamadazte et al., 2012] Tamadazte, B., Piat, N. L.-F., and Marchand, E. (2012). A direct visual servoing scheme for automatic nanopositioning. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 17(4) :728–736.
- [Tanikawa and Arai, 1999] Tanikawa, T. and Arai, T. (1999). Development of a micro-manipulation system having a two-fingered micro-hand. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 15(1) :152–162.
- [Thompson and Fearing, 2001] Thompson, J. and Fearing, R. (2001). Automating microassembly with ortho-tweezers and force sensing. In *International Conference on Intelligent robots and Systems (IROS)*, Maui HI. x.

- [Timber,] Timber. Weighing Platform for Vehicle ref : WWSE15T.
- [Tolfree and Jackson, 2006] Tolfree, D. and Jackson, M. (2006). *Commercializing Micro-Nanotechnology Products*. CRC Press.
- [Truck Weigh,] Truck Weigh. http://www.direct-pesage.net/page.php?lg=fr&rub=02&id_-catalogue=382&racine.
- [Tsai et al., 2005] Tsai, Y.-C., Lei, S., and Sudin, H. (2005). Design and analysis of planar compliant microgripper based on kinematic approach. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15(1) :143.
- [Tsui et al., 2004] Tsui, K., Geisberger, A., Ellis, M., and Skidmore, G. (2004). Micromachined end-effector and techniques for directed mems assembly. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14(4) :542.
- [Uchino, 2010] Uchino, editor (2010). *Advanced piezoelectric materials : Science and technology*. Elsevier.
- [Ullrich et al., 2013] Ullrich, F., Bergeles, C., Pokki, J., Ergeneman, O., Erni, S., Chatzipirpiridis, G., and Nelson, B. J. (2013). Mobility experiments with microrobots for minimally invasive intraocular surgery. *Investigative ophthalmology & visual science*, 54(4) :2853–2863.
- [Venant et al., 2010] Venant, N., Nigues, A., Marchi, F., Hrouzek, M., Comin, F., Chevrier, J., and Florens, J. L. (2010). Multi-sensorial interface for 3d teleoperations at micro and nanoscale. In *Haptics : generating and perceiving tangible sensations*, Springer Berlin Heidelberg :35–42.
- [Volpe and Khosla, 1993] Volpe, R. and Khosla, P. (1993). A theoretical and experimental investigation of explicit force control strategies for manipulators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38(11) :1634–1650.
- [Wang et al., 2013] Wang, D., Yang, Q., and Dong, H. (2013). A monolithic compliant piezoelectric-driven microgripper : Design, modeling, and testing. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(1) :138–147.
- [Wang et al., 2014a] Wang, F., Liang, C., Tian, Y., Zhao, X., and Zhang, D. (2014a). Design of a piezoelectric-actuated microgripper with a three-stage flexure-based amplification. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, PP(99) :1–9.
- [Wang et al., 2014b] Wang, H.-Y., Fan, K.-C., Ye, J.-K., and Lin, C.-H. (2014b). A long-stroke nanopositioning control system of the coplanar stage. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(1) :348–356.
- [Wang et al., 2010a] Wang, L., Ren, L., Mills, J., and Cleghorn, W. (2010a). Automated 3-d micrograsping tasks performed by vision-based control. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 7 :417 – 426.
- [Wang et al., 2009] Wang, Z., Miao, J., and Tan, C. (2009). Acoustic transducers with a perforated damping backplate based on pzt/silicon wafer bonding technique. *Sensors and Actuators A : Physical*, 149 :pp. 277–283.
- [Wang et al., 2010b] Wang, Z., Miao, J., Tan, C., and Xu, T. (2010b). Fabrication of piezoelectric mems devices-from thin film to bulk pzt wafer. *Journal of Electroceramics*, 24 :pp. 25–32.
- [Wason et al., 2012] Wason, J., Wen, J., Gorman, J., and Dagalakakis, N. (2012). Automated multiprobe microassembly using vision feedback. *IEEE Transactions on Robotics*, 28(5) :1090–1103.

- [Weber et al., 2012a] Weber, N., Zappe, H., and Seifert, A. (2012a). A tunable optofluidic silicon optical bench. *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, 21(6) :1357–63.
- [Weber et al., 2012b] Weber, N., Zappe, H., and Seifert, A. (2012b). A tunable optofluidic silicon optical bench. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 21(6) :1357–1364.
- [Wei et al., 2013] Wei, J., Porta, M., Tichem, M., Staufer, U., and Sarro, P. (2013). Integrated piezoresistive force and position detection sensors for micro-handling applications. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 22(6) :1310,1326.
- [Wilson et al., 2009] Wilson, S., Jourdain, R., and Owens, S. (2009). Pre-stressed piezoelectric bimorph micro-actuators based on machined 40 pzt thick films : batch scale fabrication and integration with mems. In *ASME 2009 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, pages pp. 247–252.
- [Wisitsoraat et al., 2007] Wisitsoraat, A., Patthanasetakul, V., Lomas, T., and Tuantranont, A. (2007). Low cost thin film based piezoresistive mems tactile sensor. *Sensors and Actuators A : Physical*, 139(1) :17–22.
- [Wolffenbuttel, 2005] Wolffenbuttel, R. F. (2005). MemS-based optical mini- and microspectrometers for the visible and infrared spectral range. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15 :145152.
- [Wood et al., 2009] Wood, R. J., Cho, K.-J., and Hoffman, K. (2009). A Novel Multi-Axis Force Sensor for Microrobotics Applications. *Smart Materials and Structures*, 18.
- [Wu et al., 2000] Wu, M. C., Fan, L., and Su, G.-D. (2000). Micromechanical photonic integrated circuits. *IEICE Transactions Electronic*, E83-C :903911.
- [Xie and Régnier, 2009] Xie, H. and Régnier, S. (2009). Three-dimensional automated micro-manipulation using a nanotip gripper with multi-feedback. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(7) :075009.
- [Xie et al., 2008] Xie, Y., Sun, D., Liu, C., and Cheng, S. H. (2008). An adaptive impedance force control approach for robotic cell microinjection. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 907–912.
- [Xie et al., 2010] Xie, Y., Sun, D., Liu, C., Tse, H. Y., and Cheng, S. H. (2010). A force control approach to a robot-assisted cell microinjection system. *The International Journal of Robotics Research*, 29(9) :1222–1232.
- [Xie et al., 2013] Xie, Y., Tan, Y., and Dong, R. (2013). Nonlinear modeling and decoupling control of xy micropositioning stages with piezoelectric actuators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(3) :821–832.
- [Xu et al., 2001] Xu, G., Luo, H., Guo, Y., Gao, Y., Xu, H., Qi, Z., Zhong, W., and Yin, Z. (2001). Growth and piezoelectric properties of pb (mg 1/3 nb 2/3) o 3–pbtio 3 crystals by the modified bridgman technique. *Solid state communications*, 120(7) :321–324.
- [Xu, 2013a] Xu, Q. (2013a). A new compliant microgripper with integrated position and force sensing. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*.
- [Xu, 2013b] Xu, Q. (2013b). Precision position/force interaction control of a piezoelectric multimorph microgripper for microassembly. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10(3) :503–514.
- [Xu and Li, 2012] Xu, Q. and Li, Y. (2012). Model predictive discrete-time sliding mode control of a nanopositioning piezostage without modeling hysteresis. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 20(4) :983–994.

- [Xu et al., 2007] Xu, X., Li, B., Feng, Y., and Chu, J. (2007). Design, fabrication and characterization of a bulk-pzt-actuated mems deformable mirror. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 12 :pp. 2439.
- [Y. Sun, 2005] Y. Sun, S. N. Fry, D. P. P. D. B. B. J. N. (2005). Characterizing Fruit Fly Flight Behavior Using a Microforce Sensor With a New Comb-Drive Configuration. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 14(1) :4–11.
- [Y. Sun, 2003] Y. Sun, K-T. Wan, K. P. R. J. C. B. B. J. N. (2003). Mechanical Property Characterization of Mouse Zona Pellucida. *IEEE Transactions on NanoBioscience*, 2.
- [Yesin and Nelson, 2005] Yesin, K. and Nelson, B. (2005). A cad-model based tracking system for visually guided microassembly. *Robotica*, 23 :409418.
- [Yi-Gui et al., 2011] Yi-Gui, L., Jian, S., Chun-Sheng, Y., Jing-Quan, L., Susumu, S., and Arai-Katsuhiko, T. (2011). Fabrication and characterization of a lead zirconate titanate micro energy harvester based on eutectic bonding. *Chinese Physics Letters*, 28(6) :pp. 068103.
- [Zang et al., 2004] Zang, H., Bellouard, Y., Burbet, E., Clavel, R., Poo, A. N., and Hutmacher, D. W. (2004). Shape memory alloy microgripper for robotic microassembly of tissue engineering scaffolds. In *International Conference on Robotics and Automation*, pages 4918–4924, New Orleans, USA.
- [Zea et al., 2012] Zea, J. G., Sandoz, P., Laurent, G. J., Lemos, L. L., and Clevy, C. (2012). Twin-Scale Vernier Micro-Pattern for Visual Measurement of 1D In-Plane Absolute Displacements with Increased Range-to-Resolution Ratio . In *Optomechatronic Technologies (ISOT), 2012 International Symposium on*, volume 76.
- [Zhang et al., 2015] Zhang, S., Li, F., Jiang, X., Kim, J., Luo, J., and Geng, X. (2015). Advantages and challenges of relaxor-pbftio 3 ferroelectric crystals for electroacoustic transducers—a review. *Progress in materials science*, 68 :1–66.
- [Zhao et al., 2007] Zhao, H., Yang, J., and Shen, J. (2007). Simulation of thermal behavior of a cnc machine tool spindle. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(6) :1003–1010.
- [Zhao et al., 2003] Zhao, X., Wang, J., Chan, H., Choy, C., and Luo, H. (2003). Effect of a bias field on the dielectric properties of 0.69 pb (mg1/3nb2/3) o3–0.31 pbtio3 single crystals with different orientations. *Journal of Physics : Condensed Matter*, 15(40) :6899.
- [Zhou et al., 2006] Zhou, Q., Korhonen, P., Laitinen, J., and Sjövall, S. (2006). Automatic dextrous microhandling based on a 6 dof microgripper. *Journal of Micromechatronics*, 3 :359–387.
- [Zhou et al., 1998] Zhou, Y., Nelson, B. J., and Vikramaditya, B. (1998). Fusing force and vision feedback for micromanipulation. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2 :12201225.
- [Zhu, 2008] Zhu, J. (2008). *Robust Thermal Error Modeling and Compensation for CNC Machine Tools*. PhD thesis, The University of Michigan.

Résumé :

Ce document présente une synthèse de mes contributions scientifiques aux domaines de la microrobotique et de la micromécatronique ainsi que des transferts effectués, tant à destination de l'industrie que de l'enseignement. Les travaux conduits sont orientés vers la réalisation de tâches de micro-assemblage complexes, précises et automatisées par approche microrobotique et sont plus particulièrement appliqués aux MOEMS. L'échelle micrométrique considérée induit de nombreuses spécificités qui se traduisent par un déficit notable de connaissances du comportement des systèmes à cette échelle. Pour cela, une première partie des travaux est dédiée à l'étude et à la modélisation multiphysique des systèmes microrobotiques et micromécatroniques. Cette connaissance a conduit, dans une seconde partie des travaux, à la proposition de nouveaux principes de mesure et d'actionnement mais également au développement de microsystèmes complexes, instrumentés et intégrés (micro-banc-optique, micropince, plateformes compliantes). Enfin, des lois de commandes et des stratégies d'assemblage originales ont été proposées notamment une commande dynamique hybride force-position combinant une commande hybride externe et une commande en impédance. Celle-ci permet de maîtriser la dynamique des transitions contact/non-contact critique à l'échelle micrométrique mais également d'automatiser des processus de micro-assemblage complexes. L'ensemble de ces travaux ont fait l'objet de validations expérimentales permettant de quantifier précisément les performances obtenues (exactitude de positionnement, temps de cycle, robustesse...). Les perspectives de ces travaux portent sur la proposition de systèmes microrobotiques et micromécatroniques compacts et intégrés utiles au micro-assemblage haute dynamique ainsi qu'à l'assemblage de composants nanophotoniques.

The logo for the SPIM doctoral school, featuring a stylized 'S' followed by the letters 'PIM' in a large, white, sans-serif font.

■ École doctorale SPIM 16 route de Gray F - 25030 Besançon cedex

■ tél. +33 (0)3 81 66 66 02 ■ ed-spim@univ-fcomte.fr ■ www.ed-spim.univ-fcomte.fr

The logo of the University of Franche-Comté, featuring a stylized 'U' and 'FC' with a vertical bar between them, and the text 'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ' below.